



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**STUDIUM TEPELNÝCH POMĚRŮ A VHODNÝCH
MATERIÁLŮ PRO KONSTRUKCI ENERGETICKÉHO
ZÁSOBNÍKU PRO DLOUHODOBÉ UKLÁDÁNÍ
ENERGIE V PODMÍNKÁCH KLIMATU ČR**

STUDY OF THERMAL CONDITIONS AND THE APPROPRIATE MATERIALS FOR
CONSTRUCTION OF THE ENERGY RESERVOIR FOR LONG TERM STORAGE IN THE
CONDITIONS OF CLIMATE CR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Veronika Bukvová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. RNDr. Ing. STANISLAV ŠŤASTNÍK, CSc.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Veronika Bukvová
Název	Studium tepelných poměrů a vhodných materiálů pro konstrukci energetického zásobníku pro dlouhodobé ukládání energie v podmínkách klimatu ČR
Vedoucí práce	prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc.
Datum zadání	31. 3. 2017
Datum odevzdání	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Davies, Morris, G., Building Heat Transfer, John Wiley 2004

Halahyja, M. a kol., Stavebná tepelná technika. Tepelná ochrana budov, Jaga Bratislava 1998

ČSN 730540, Tepelná ochrana budov, ÚNMZ 2011

Dostupná firemní dokumentace o žárovzdorných materiálech

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Využívání solárních systémů s dlouhodobou akumulací tepla nabízí účelný způsob úspor energie. Většinou se používají zásobníky k ukládání tepelné energie zachycené solárními kolektory a energie se ukládá do zásobníků v letním období. Ty mají poskytnout dostatečnou zásobu energie pro období zimní dodávku tepla. Selektce vhodných materiálů není jednoduchá, omezením bývají související finanční náklady, technické problémy s udržením dostatečného vakua aj.

V této souvislosti sestavte:

- 1) přehled technologií pro dlouhodobé ukládání tepelné energie pro potřeby v bytové výstavbě,
- 2) popište konstrukční uspořádání tepelných zásobníků pro dlouhodobé ukládání tepelné energie,
- 3) vymezte fyzikální vlastnosti materiálů použitelné pro konstrukci vysokoteplotních akumulačních zásobníků,
- 4) popište další související požadavky na technické vlastnosti materiálů použitelné pro konstrukci tepelných zásobníků,
- 5) ověřte složení a fyzikální vlastnosti u vybraných materiálů pro ukládání tepla, jejich hodnoty součinitele tepelné vodivosti a tepelné kapacity v závislosti na teplotě,
- 6) proveďte návrh velikosti solárního kolektoru a potřebného objemu akumulačního jádra pro zásobování vybraného objektu teplem v klimatických podmínkách ČR.

Při vypracování diplomní práce dbejte zásad platných na FAST VUT Brno; požadovaný rozsah diplomové práce 70 - 80 stran včetně tabulek a grafů.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

prof. RNDr. Ing. Stanislav Štastník, CSc.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá vhodnými způsoby ukládání tepelné energie a selekcí materiálů pro vysokokapacitní zásobník. V práci jsou popsány technologie využívané v současné době pro dlouhodobé ukládání tepelné energie, konstrukční uspořádání tepelného zásobníku, fyzikální vlastnosti materiálů použitelných pro konstrukci vysokoteplotních zásobníků a využitelnost těchto materiálů. V práci je popsán postup měření materiálových charakteristik a způsob vyhodnocení. Dále je v práci proveden návrh velikosti solárního kolektoru a potřebného objemu akumulčního jádra pro zásobování vybraného objektu teplem v klimatických podmínkách ČR.

KLÍČOVÁ SLOVA

Sluneční záření, tepelná energie, solární kolektor, akumulace, zásobník, součinitel tepelné vodivosti, tepelná kapacita, metoda topného drátu.

ABSTRACT

Presented work deals with appropriate ways of storing thermal energy and selection of materials for a high capacity storage unit. The thesis describes technologies currently used for long-term storage of thermal energy, the structural arrangement of the thermal unit, physical properties of the materials usable for construction of high-temperature storage units and the utilization of these materials. The thesis also describes the measuring procedure of the material characteristics and the method of evaluation. Size of the solar collector and the required volume of the storage for heat supplying of the selected building in the climatic conditions of the Czech Republic were designed.

KEYWORDS

Solar radiation, thermal energy, solar collector, accumulation, storage unit, a coefficient of thermal conductivity, heat capacity, hot wire method.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Veronika Bukvová. *Studium tepelných poměrů a vhodných materiálů pro konstrukci energetického zásobníku pro dlouhodobé ukládání energie v podmínkách klimatu ČR*. Brno, 2018. 76 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 9. 1. 2018

Bc. Veronika Bukvová
autor práce

Poděkování

V první řadě bych chtěla poděkovat celé mé rodině a partnerovi, kteří mi byli po celou dobu studia oporou, a díky kterým mohla vzniknout tato diplomová práce. Dále bych ráda poděkovala vedoucímu práce, panu prof. RNDr. Ing. Stanislavu Šťastníkovvi, CSc., za odborné vedení, konzultace, cenné rady, korekce a připomínky při zpracování této diplomové práce a panu RNDr. Ing. Františkovi Šotovi za užitečné rady a nenahraditelnou pomoc při přípravě experimentálního měření.

OBSAH

1	ÚVOD	10
2	SOLÁRNÍ ENERGIE	11
3	SOLÁRNÍ TEPELNÉ SYSTÉMY	12
3.1	SOLÁRNÍ SBĚRAČE	12
3.1.1	SOLÁRNÍ TEPELNÝ KOLEKTOR	12
3.1.2	TROMBEHO STĚNA	14
3.1.3	FRESNELOVA ČOČKA	14
3.1.4	PARABOLICKÝ KONCENTRÁTOR SLUNEČNÍ ENERGIE	15
3.1.5	PARABOLICKÝ KONCENTRÁTOR SLUNEČNÍ ENERGIE SE STIRLINGOVÝM MOTOREM	16
3.2	TEPELNÝ ZÁSOBNÍK	17
3.2.1	TEPELNÁ VODIVOST	17
3.2.2	MĚRNÁ TEPELNÁ KAPACITA	17
3.2.3	TEPELNÁ AKUMULACE	17
3.3	PRINCIPY AKUMULACE TEPLA	18
3.3.1	AKUMULACE POMOCÍ SENZIBILNÍHO ZÁSOBNÍKU	19
3.3.2	AKUMULACE POMOCÍ LATENTNÍHO ZÁSOBNÍKU	19
3.3.3	AKUMULACE REAKČNÍHO TEPLA	21
3.3.4	AKUMULACE S VYUŽITÍM SORPCE	22
4	ŽÁROVZDORNÉ MATERIÁLY	23
4.1	ŽÁROBETON	23
4.2	HLINITOKŘEMIČITÉ MATERIÁLY	25
5	KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ TEPELNÉHO ZÁSOBNÍKU	26
6	NÁVRH VELIKOSTI SOLÁRNÍHO KOLEKTORU A POTŘEBNÉHO OBJEMU AKUMULAČNÍHO JÁDRA TEPELNÉHO ZÁSOBNÍKU	30
7	PRAKTICKÁ ČÁST	33
8	MĚŘENÍ SOUČinitele TEPELNÉ VODIVOSTI	42
8.1	METODA TOPNÉHO DRÁTU	42
8.2	UPRAVENÁ METODA TOPNÉHO DRÁTU	44
9	PRAKTICKÁ ČÁST	46
9.1	VZOREK – ŽÁROBETON MEBET ACU-M	47
9.2	VZOREK – ŽÁROBETON TERMBET OL-12	53
9.3	VZOREK – SLIQ	58
9.4	VZOREK – ŠAMOT Č. OH1927	60

9.5	VZOREK – ŠAMOT Č. OH1987	64
9.6	MATERIÁLOVÁ CHARAKTERISTIKA MĚŘENÝCH VZORKŮ	68
10	ZÁVĚR	72
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	73
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	76

1 ÚVOD

Ekologie a ochrana životního prostředí jsou dnes často skloňované pojmy se širokým významem. Zjednodušeně se jedná o to, abychom se k přírodě chovali co nejšetrněji, tak aby netrpěla. V ideálním případě bychom měli přírodě pomoci se zotavit. Proti této myšlence stojí činnost člověka, jehož cílem je maximální výtěžnost z přírody pro uspokojení nejrůznějších lidských potřeb. Činnosti lidstva (např. těžba nerostných surovin, intenzivní zemědělská výroba, čerpání neobnovitelných přírodních zdrojů atd.) má na životní prostředí negativní vliv. Následky takové činnosti mohou být nepřímé, mohou se projevit až za několik let a daleko od místa původu. V každém případě tyto následky mohou být katastrofální. Nepodaří-li se nám obnovit přírodu, je třeba alespoň ochraňovat to, co nám zůstalo.

Jednou z mnoha možností ochrany přírody je využívání solární energie. Jde o využívání obnovitelného zdroje, který je nevyčerpatelný, nemá téměř žádný dopad na životní prostředí, neprodukuje škodlivé odpady, ani neovlivňuje tepelnou rovnováhu Země. Nezanedbatelnou výhodou tohoto druhu energie je i skutečnost, že je k dispozici zadarmo a nehrozí tedy problémy související se zvyšováním cen jako je tomu u fosilních paliv. Využívání energie slunečního záření patří z hlediska ochrany životního prostředí k nejčistším a nejšetrnějším způsobům výroby energie.

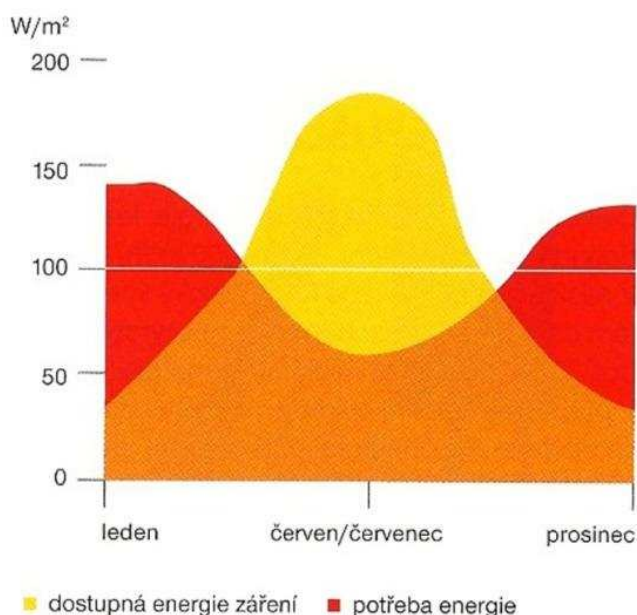
Co kdyby bylo možné takový druh energie zachytit, na vhodném místě akumulovat a uchovat jej pro pozdější potřebu? Solárních kolektorů určených k zachycení solární energie a k její přeměně na tepelnou energii známe hned několik druhů. Stejně tak známe i spoustu zásobníků určených k uchování tepelné energie. Ale existuje materiál, který by byl schopen uchovat takové množství tepelné energie, aby nám umožnil překonat nerovnoměrnost mezi výrobou a spotřebou a zásobovat tak stavební objekt energií, pocházející pouze ze slunečního záření? Takový materiál by musel disponovat určitými tepelnými vlastnostmi, a právě jejich charakteristikou se budu v následující práci zabývat. Dále se práce zabývá konstrukčním uspořádáním těchto tepelných zásobníků a návrhem velikosti solárního kolektoru a potřebného objemu akumulčního jádra.

2 SOLÁRNÍ ENERGIE

Solární energie je energetický zdroj, kterého je a dlouho bude v přírodě dostatek. Sluneční výkon 40 bilionkrát přesahuje teoretickou spotřebu lidstva, avšak z toho množství dokážeme využít pouze část. V úvahu je třeba brát skutečnost, že z celkového dopadajícího záření 180 000 TW se čtvrtina odrazí zpět do kosmického prostoru, pětina je pohlcena atmosférou a polovina se přemění v teplo na povrchu Země. I přes to, že je sluneční záření vydatným obnovitelným zdrojem energie, tak se na povrch Země nedostává 24 hodin denně, ale je pro nás k dispozici přibližně jen 8 hodin denně, a to ve slunečné dny. Některé dny, kdy je nepříznivé počasí, nemusí být k dispozici vůbec. V současnosti je možné z jednoho metru aktivní plochy získat pouze maximálně 110 kWh elektrické energie za rok. A to je důvod, proč sluneční energii akumulovat. [1]

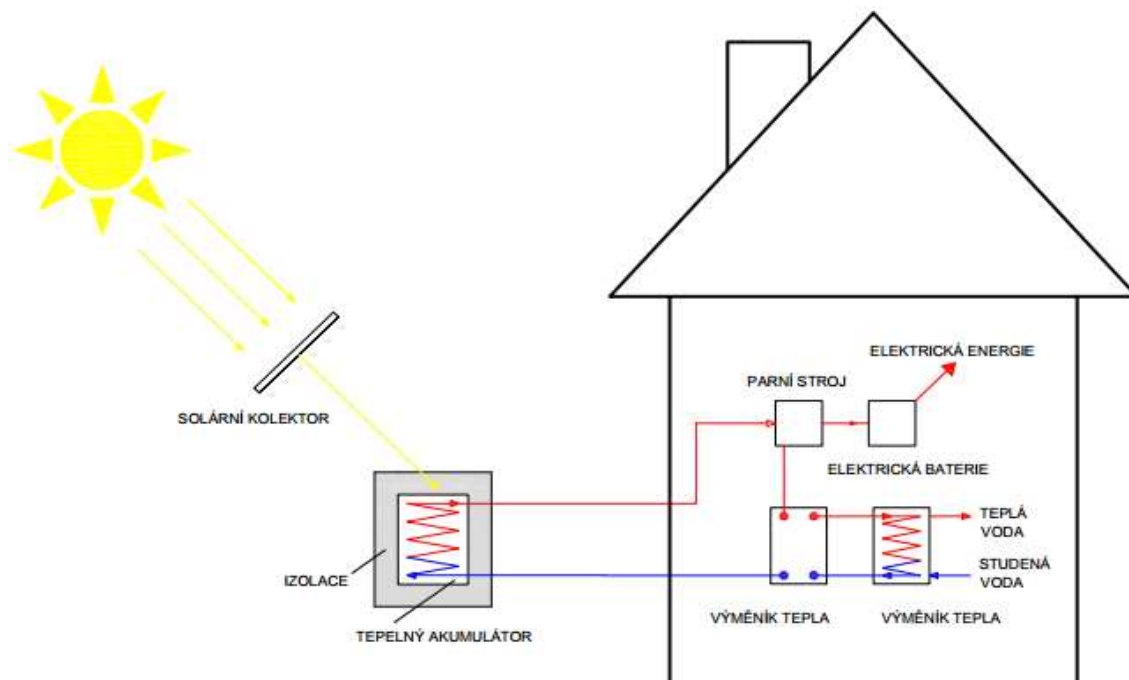
Aby bylo možné ve vysokokapacitním tepelném zásobníku akumulovat co největší množství tepelné energie, musí být celý solární systém složen z takových prvků, které tuto skutečnost umožní.

Dopadající sluneční záření je zachyceno solárním kolektorem a koncentrováno do určitého místa. Sluneční energie je dále vhodným způsobem přemístěna do tepelného zásobníku. V případě potřeby je energie odváděna ze zásobníku a využívána jak k ohřevu vody, vytápění, tak i k výrobě elektrické energie.



Obrázek 1 Rozložení sluneční energie během roku [12]

3 SOLÁRNÍ TEPELNÉ SYSTÉMY



Obrázek 2 Schéma solárního akumulčního systému

3.1 SOLÁRNÍ SBĚRAČE

3.1.1 SOLÁRNÍ TEPELNÝ KOLEKTOR

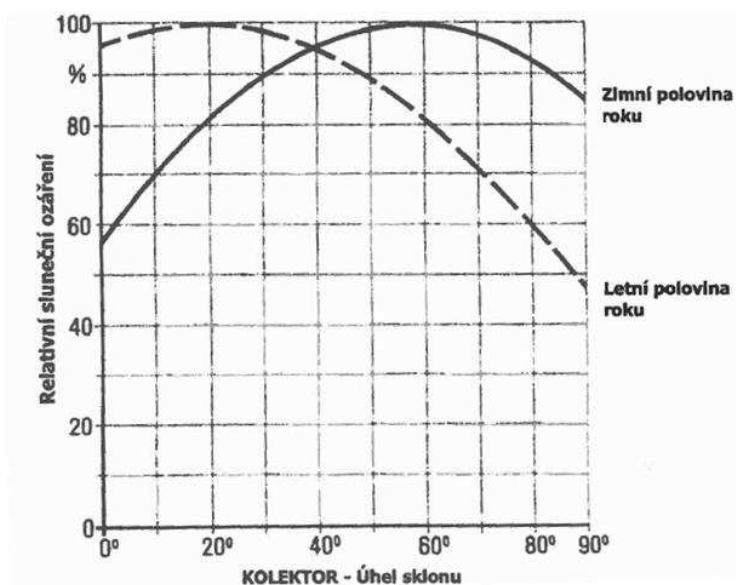
Jedná se o zařízení určené k pohlcení slunečního záření a jeho následné přeměně na tepelnou energii. Sluneční paprsky dopadající na termický kolektor jsou pohlcovány absorbérem umístěným v kolektoru. V absorbéru dochází k přeměně slunečních paprsků na tepelnou energii. Absorbér tvoří trubky umístěné těsně vedle sebe, což umožňuje lepší šíření tepla. V trubkách se nachází teponosná kapalina (voda, nemrznoucí směs vody a propylenglykolu), která přemísťuje teplo do zásobníku.

Účinnost kolektorů dosahuje až 75 %. Absorbér, tvořený z měděných trubek a plechů, je pokryt selektivní vrstvou zbarvenou modře až černě, díky které dochází k pohlcení značné části sluneční energie a zároveň téměř nedochází k vyzařování energie ve formě tepla do okolí. Popsaný kolektor je vhodný pouze pro vodní zásobníky.



Obrázek 3 Konstrukce solárního kolektoru [22]

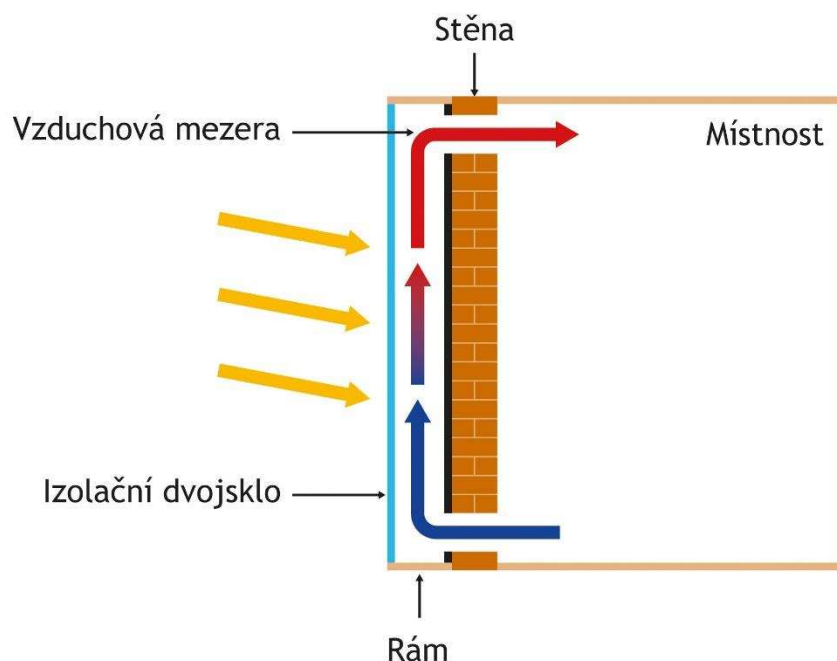
Chceme-li zachytit co nejvíce slunečního záření, je třeba se zabývat také sklonem a orientací kolektorů. Sклон musí být takový, aby kolektor mohl zachytit co nejvíce sluneční energie jak v letním, tak v zimním období. Optimální sklon pro sezónní letní provoz je $25^\circ - 35^\circ$. Pro sezónní zimní provoz to je $60^\circ - 90^\circ$. Jestliže má být provoz zásobníku tepla celoroční, pak se jako optimální jeví sklon kolektoru $40^\circ - 45^\circ$.



Obrázek 4 Účinnost solárního kolektoru podle jeho úhlu sklonu v ročním období [22]

3.1.2 TROMBEHO STĚNA

Jedná se o stěnu natřenou černou barvou, která absorbuje teplo z dopadajících slunečních paprsků a zahřívá se tak. Akumulované teplo je pak vyzařováno do okolí. Před zdí může být skleněná bariéra a prostor mezi ní a sklem funguje jako skleník. Před zdí může být skleněná bariéra a prostor mezi ní a sklem funguje jako skleník.

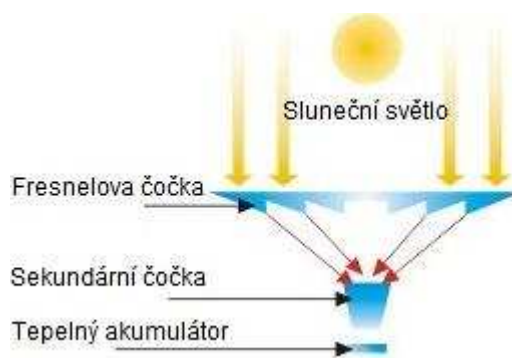


Obrázek 5 Schéma proudění vzduchu při ohřevu v Trombeho stěně [23]

3.1.3 FRESNELOVA ČOČKA

Pro vysokokapacitní zásobník je nutné využít odlišný typ solárního sběrače. Vhodným druhem takového solárního kolektoru pro vysokokapacitní solární zásobník je Fresnelova čočka nebo parabolický koncentrátor sluneční energie. Tyto zrcadla či koncentrátory odrážejí záření z velké plochy a koncentrují jej do malé oblasti. Záření je poté přeměněno na teplo. Je nutné brát v úvahu i to, že různé solární sběrače poskytují i různou účinnost. Koncentrace slunečních paprsků umožňuje i dosažení vyšší teploty v tepelném absorbéru. Je-li dosaženo dostatečně vysokých teplot, při kterých vzniká přehřátá pára, je možné pomocí generátoru vyrábět i elektrickou energii. Jestliže solární sběrač disponuje natáčecím systémem, je možné takovým způsobem sluneční záření soustřeďovat do požadované oblasti.

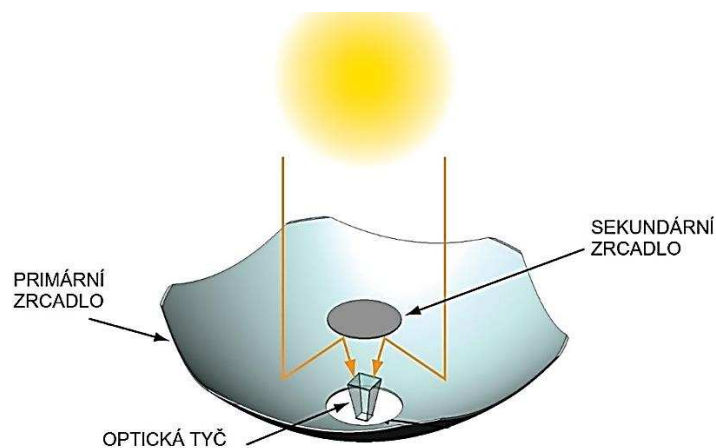
Fresnelova čočka je deska s řadou drážek. Každá z nich má stejný profil jako odpovídající část konvenční čočky. Z čočky jsou odstraněny ty části, které se přímo nepodílejí na lomu paprsků. Díky tomu je dosaženo úspory materiálu, která snižuje výrobní náklady. Čočka slouží ke koncentraci solární energie a k získání vyšší teploty v tepelném absorbéru.



Obrázek 6 Schéma uspořádání Fresnelovy čočky pro koncentraci slunečního záření [2]

3.1.4 PARABOLICKÝ KONCENTRÁTOR SLUNEČNÍ ENERGIE

Kolektor využívá odrazu dopadajícího slunečního záření od odrazivé plochy do ohniska paraboly a koncentraci této energie. Energie je dále vhodným způsobem přemísťována do zásobníku. Podle časové polohy Slunce v průběhu dne se parabola otáčí a dochází tak k absorpci co největšího množství solární energie. Také tento způsob je vhodný pro vysokokapacitní tepelný zásobník.



Obrázek 7 Schéma parabolického solárního koncentrátoru [3]

Sluneční záření není na povrchu Země rozloženo rovnoměrně. Nejvíce slunečního záření dopadá na povrch v blízkosti rovníku. Mění se tedy i potenciál, který by mohl být využíván v závislosti na geografické poloze. Dále zde hraje roli i prodlužování a zkracování denní doby. To lze řešit využitím natáčecích zařízení sledující pohyb slunce a umožňující tak zvýšení příjmu výrazně zvýšit příjem energie v oblastech vzdálených od rovníku. Účinnost parabolického koncentrátoru se pohybuje kolem 35 %. [3]

3.1.5 PARABOLICKÝ KONCENTRÁTOR SLUNEČNÍ ENERGIE SE STIRLINGOVÝM MOTOREM

Výroba energie ze slunečního záření pomocí Stirlingova motoru je velmi efektivní. Motor je pevně umístěn pomocí jednoho nebo více ramen v ohnisku zrcadla, ve kterém je koncentrováno sluneční záření. Soustava se natáčí za Sluncem tak, aby byl výkon optimální.



Obrázek 8 Schéma parabolického koncentrátoru se Stirlingovým motorem [6]

3.2 TEPELNÝ ZÁSOBNÍK

Pro akumulaci tepelné energie slouží zásobníky tepla, které zastupují v solární technice důležitou roli. Zásobník akumuluje tepelnou energii a uchová ji pro pozdější využití. Umožní tak překonat nerovnoměrnost mezi výrobou a spotřebou.

U tepelných zásobníků se sleduje množství tepla, které je zásobník schopen akumulovat v objemu 1 m³, tedy hustota akumulace, která je rozhodující pro návrh jeho velikosti. Materiál s velkou hustotou akumulace umožňuje navrhnout zařízení menších rozměrů než materiál s menší hustotou akumulace. Materiál musí disponovat i velkou tepelnou vodivostí z toho důvodu, aby bylo možné teplo v zásobníku rovnoměrně rozvrstvit a bylo tak rozvrženo do celého objemu akumulátoru. Naopak v období vybíjení zásobníku musí být teplo snadno odvedeno z celého objemu.

3.2.1 TEPELNÁ VODIVOST

Součinitel tepelné vodivosti λ udává množství tepla, které prostoupí 1 m² plochy při teplotním spádu 1 K.m⁻¹. Hodnotu součinitele tepelné vodivosti ovlivňuje řada faktorů, mezi ty nevýznamnější patří teplota. Se zvyšující se teplotou roste i tepelná vodivost. Dalším faktorem významně ovlivňujícím součinitel tepelné vodivosti je objemová hmotnost. Pro vyšší teploty jsou vhodnější materiály s vyšší objemovou hmotností. Dále je to pórovitost, chemické a mineralogické složení. Se zvyšující se teplotou roste i hodnota součinitele tepelné vodivosti.

3.2.2 MĚRNÁ TEPELNÁ KAPACITA

Měrná tepelná kapacita c_p vyjadřuje množství tepla potřebného k ohřátí 1 kg látky o 1 K. Lze ji vyjádřit rovnicí:

$$c_p = \frac{Q}{m(T_2 - T_1)}.$$

3.2.3 TEPELNÁ AKUMULACE

Tepelná akumulace je schopnost materiálu při ohřívání přijímat určité množství tepla, které při ochlazování odevzdává okolí. Tepelně akumuláční schopnost je tím

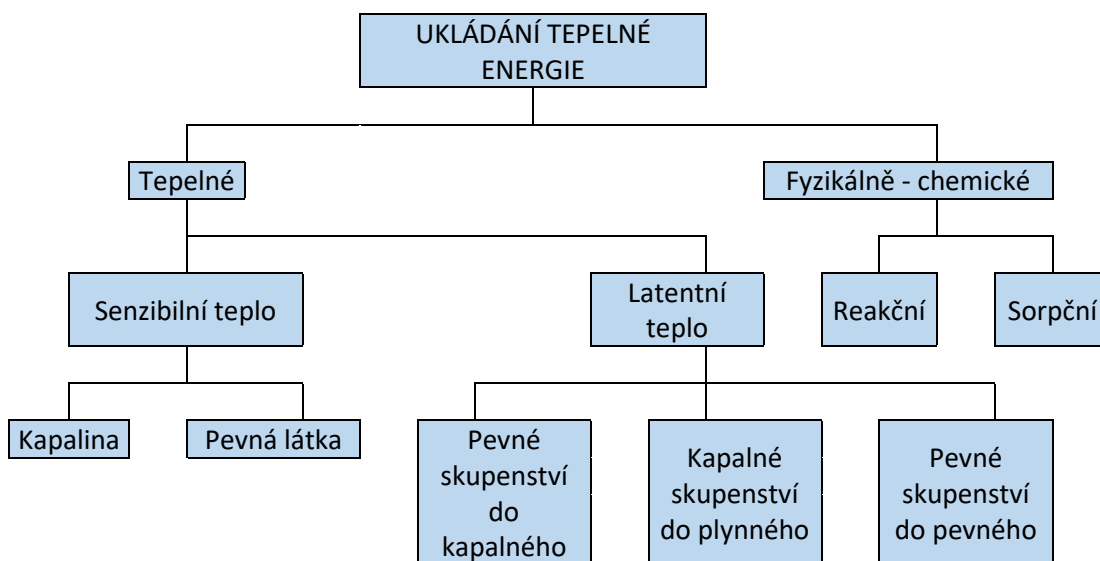
větší, čím větší je objemová hmotnost a měrná tepelná kapacita materiálu. Dobrou tepelnou akumulací se vyznačují materiály, které dokážou pojmout velké množství tepla a zároveň k odevzdání tepla do okolí dochází poměrně pomalu.

S rostoucí hodnotou měrného tepla roste hodnota akumulace tepla. Materiál musí mít velkou tepelnou vodivost z toho důvodu, aby bylo možné teplo v zásobníku rovnoměrně rozvrstvit a bylo tak rozvrženo do celého objemu akumulátoru. Naopak v období vybíjení zásobníku musí být teplo snadno odvedeno z celého objemu.

Vhodným řešením k akumulaci tepelné energie s využitím senzibilního tepla se zdá být beton a keramika. Tyto materiály jsou ideální především vzhledem k jejich dobré tepelné vodivosti, vysokému rozmezí teplot, dostupnosti, nízké ceně a snadnému zpracování.

3.3 PRINCIPY AKUMULACE TEPLA

Tepelnou energii lze v zásobníku ukládat různými způsoby. K dispozici je tepelné skladování energie s využitím senzibilního zásobníku, latentního zásobníku, akumulace reakčního tepla a akumulace s využitím sorpce. Přehled technologií pro dlouhodobé ukládání tepelné energie je pro snadnější orientaci znázorněn na obrázku 6.



Obrázek 9 Rozdělení zásobníků [10]

3.3.1 AKUMULACE POMOCÍ SENZIBILNÍHO ZÁSOBNÍKU

Zásobník akumulující teplo, aniž by došlo k přeměně skupenství materiálu, se označuje jako zásobník senzibilní. Senzibilní akumulace tepla využívá tepelnou kapacitu a změnu tepla materiálu během procesu nabíjení a vybíjení. Problém nízké hustoty akumulace u tohoto způsobu ukládání tepla musí být kompenzován poměrně velkým objemem zásobníku. Čím vyšší tedy bude objemová hmotnost média, tím menší rozměry jádro zásobníku může mít. Matematicky lze tento děj popsat podle následující rovnice:

$$Q = mc\Delta T$$

Pro tento druh zásobníku se volí materiál s vysokou tepelnou kapacitou a nízkými pořizovacími náklady. Těmto požadavkům nejlépe odpovídá voda s tepelnou kapacitou $1160 \text{ Wh}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}$ a hustotou akumulace $100 - 300 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$. Problém nastává v rozsahu teplot, které se pohybují jen mezi 0°C a 100°C . Materiál vhodný pro konstrukci vysokokapacitního zásobníku musí být schopen pracovat v daném rozmezí teplot.

Jako další vhodný materiál se nabízí beton, který je schopen pracovat do teploty až 1200°C . Je to materiál s vysokou tepelnou kapacitou, dobrými mechanickými vlastnostmi (např. tlaková pevnost) a vysokou mechanickou odolností vůči cyklickému tepelnému zatížení. Objemová kapacita je podstatně nižší než u vody, pohybuje se jen mezi 460 a $560 \text{ Wh}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}$. Výhoda v použití zásobníků s pevnými látkami je i to, že nehrozí porušení mrazem jako u zásobníků s použitím vody. [7], [8]

3.3.2 AKUMULACE POMOCÍ LATENTNÍHO ZÁSOBNÍKU

Při tomto způsobu akumulace tepla je využito skupenského tepla tání a tuhnutí a tepelné kapacity materiálu (tj. citelné teplo materiálu v kapalném a pevném stavu). Při změně skupenství látky se uvolňuje/spotřebovává energie, která je označována jako latentní a nedochází ke změně teploty. Skladovací kapacita je dána rovnicí:

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} mC_p dT + ma_m \Delta h_m + \int_{T_2}^{T_3} mC_p dT,$$

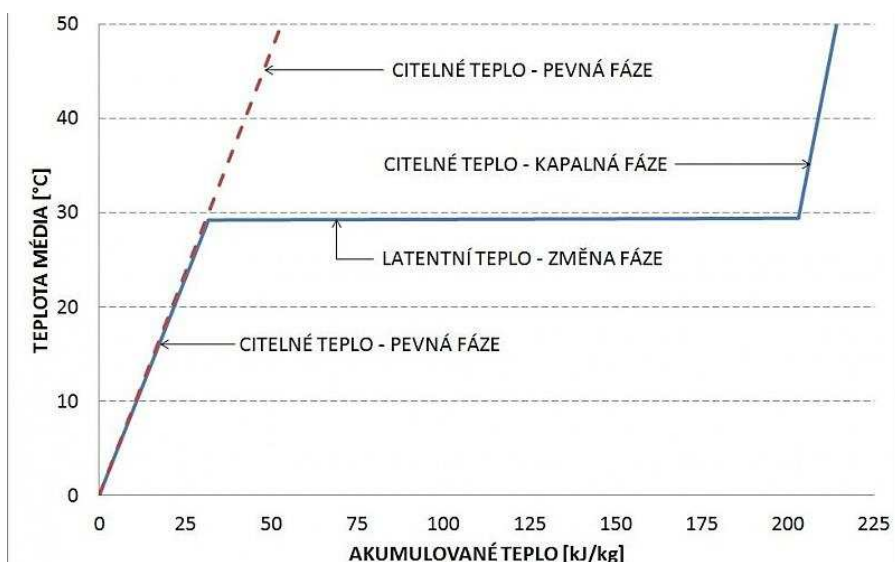
$$Q = m[C_{sp}dT(T_2 - T_1) + a_m\Delta h_m + C_{lp}(T_3 - T_2)].$$

Výhodou je především možnost větší akumulace tepla, tedy menší velikost zásobníku oproti citelnému skladování. V dnešní době se používá přechod pevné fáze v kapalinu a látky používané v rámci této technologie se označují jako materiály se změnou fáze (PCM). Hustota akumulace takových materiálů dosahuje 200 až 500 MJ.m⁻³. Vzhledem k tomu, že je při této akumulaci tepla využito fázové přeměny látek, u kterých tak dochází ke změně objemu, není tento způsob skladování energie vhodný pro vysokokapacitní zásobník. [24]

Výběrem vhodných látek se změnou skupenství ve vhodném teplotním rozmezí a způsobem jejich použití lze akumulaci optimalizovat. K dispozici jsou látky organické a látky anorganické.

Mezi organické látky vhodné k použití akumulace tepla patří technické parafíny a vosky. Hodnota skupenského tepla těchto materiálů se pohybuje mezi 90 až 200 MJ.m⁻³, ale mají velmi nízkou tepelnou vodivost 0,2 W.m⁻¹.K⁻¹. [24]

Vhodné je využití i anorganických látek, a to hydratovaných solí, např. Glauberova sůl (síran sodný Na₂SO₄.10H₂O) nebo sůl kyseliny octové (CH₃COONa.3H₂O), jejichž hodnota skupenského tepla tání je 180 až 350 MJ.m⁻³, příznivá je i hodnota tepelné vodivosti 0,5 W.m⁻¹.K⁻¹. Použití těchto materiálů v zásobnících je limitováno řadou problémů. Jde o problémy spojené se sníženou akumulační hodnotou a zvýšenou korozivitou. [24]



Obrázek 10 Porovnání průběhu teplot při akumulaci latentního tepla a akumulaci citelného tepla [25]

3.3.3 AKUMULACE REAKČNÍHO TEPLA

Akumulace s využitím chemických reakcí využívá vratných chemických reakcí vhodných látek, které jsou doprovázeny jímáním/uvolňováním (v jednom směru reakce endotermická, v druhém směru reakce exotermická) tepla.



Přivedením reakčního tepla ΔH lze sloučeninu AB rozložit na dvě samostatné látky A a B. Produkty reakce A a B musí být snadno oddělitelné. Složky AB a A jsou zpravidla v pevném nebo kapalném skupenství, látka B je zpravidla plyn. Množství naakumulovaného tepla vyjadřuje rovnice:

$$Q = a_r \cdot m \cdot \Delta H$$

Předpokládaná hustota akumulace dosahuje 1000 až 3000 MJ.m⁻³.

Mezi nejvhodnější materiály patří organické pevné látky, např. roztok pentaerythritolu, pentaglycerinu, Li₂SO₄ (síran lithný) a KHF₂ (hydrogendifluorid draselný).

3.3.4 AKUMULACE S VYUŽITÍM SORPCE

Zde je využito fyzikálního děje absorpce a adsorpce. Absorpce probíhá v kapalně látce a adsorpce v tuhé látce. Systém využívá teplo, které se uvolní při sorpci. Tento druh akumulace můžeme rozdělit na systém otevřený a systém uzavřený.

Při adsorpci dochází ke shromažďování plynné nebo rozpuštěné látky na povrchu pevné látky, to způsobuje exotermní reakci, při které dochází k uvolňování tepla. Desorpce je děj opačný. Při desorpci dochází k uvolňování absorbované látky z pevného povrchu.

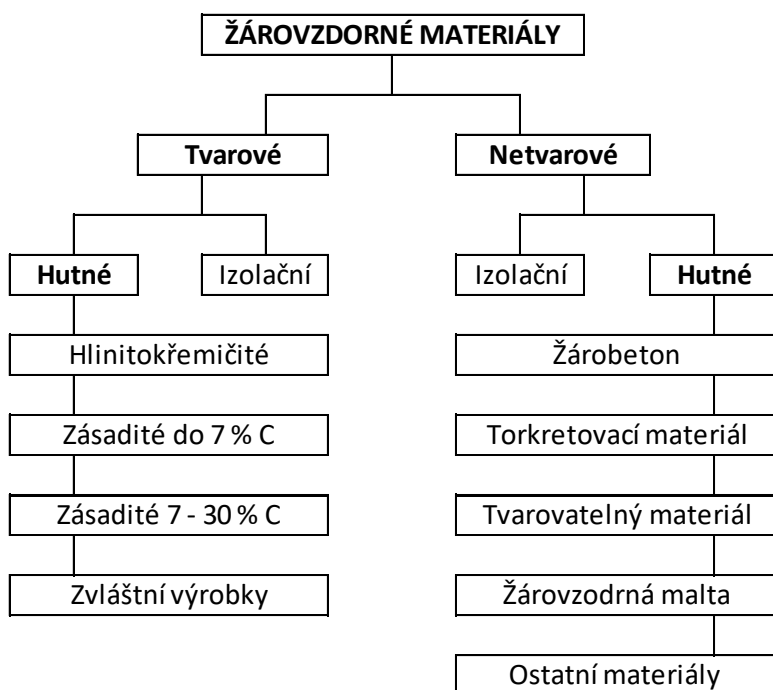
Nejčastěji používanými materiály jsou mikroporézní a mezoporézní materiály zeolity a silikagely. Z kapalných látek se nejvíce využívá LiCl (chlorid lithný). Mezi nevýhody, které omezují využití těchto látek, patří především malý rozsah provozních teplot (20 – 150 °C) a vysoká cena. Hustota akumulace tepla činí 500 až 1000 MJ.m⁻³. [26]

*Tab. 1 Fyzikální vlastnosti materiálů vhodných ke konstrukci
tepelného zásobníku [9], [10]*

Médium	Rozsah teplot [°C]	Hustota [kg.m ⁻³]	Tepelná kapacita [J/kg.°C]	Hustota energie [kJ/m ³ .°C]
Voda	0 – 100	1000	4190	4190
Beton	Max- 1200	2305	920	2122
Keramika		1969	921	1813
Šamot		2100 – 2600	1000	2100 - 2600
Hliník	max. 660	2700	920	2484
MgO	max. 2400	2900	1200	3480
Sůl	220 – 540	1733	1550	2686
Žula		2400	790	1896
Minerál takonit		3200	800	2560
Ocelová litina	max. 1150	7200	540	3889

4 ŽÁROVZDORNÉ MATERIÁLY

V oblasti vysokých teplot mají nezastupitelné postavení žárovzdorné materiály. Jedná se o materiály, které se vyznačují schopností odolávat působení vysokých teplot. Žárovzdornost se stanovuje ze žároměrné shody zkušební a laboratorní žároměrky a vyjadřuje se číslem příslušné laboratorní žároměrky, s níž se zkušební žároměrka současně dotkla podložky. Složení těchto materiálů tvoří především oxidy SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO , Cr_2O_3 a CaO .



Obrázek 11 Rozdělení materiálů [28]

4.1 ŽÁROBETON

Žárovzdornost je vlastnost žárovzdorných materiálů, která požaduje žárovou deformační teplotu nejméně 1580 °C. Tento požadavek většina betonů nesplňuje, proto je vhodnější tyto materiály označit jako betony odolné vyšším teplotám, které jsou schopné odolávat teplotám nad 200 °C. Působením vysoké teploty beton degraduje (rozklad hydratačních produktů a rozpad kameniva).

Tab. 2 Chování betonu v závislosti na teplotě [27]

Teplota [°C]	Chování betonu	
20 - 80	pomalá ztráta kapilární vody	explosivní odprýskávání
100	zřetelné zvýšení propustnosti vody	
80 - 150	dehydratace ettringitu	
150 - 170	rozklad sádry $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	
200	ztráta fyzikálně vázané vody, zvýšení vnitřního tlaku	
300	praskání křemičitého kameniva	
400	rozklad portlanditu	výskyt trhlin
500	změna krystalové fáze v kamenivu a písku	
700	rozklad uhličitanu vápenatého, uvolňování oxidu uhličitého	
1300	celkový rozklad betonu, tavení některých složek	

Beton odolný vysokým teplotám je možné vyrobit při použití speciálních materiálů. Vyhovující jsou takové materiály, které degradaci buď vůbec nepodléhají, nebo jí podléhají co nejméně.

Hutné žárovzdorné betony o objemové hmotnosti $1500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a vyšší, které jsou vystavené teplotě do $700 \text{ }^\circ\text{C}$, mohou obsahovat hutné přírodní kamenivo (čedič, diabas, andezit). Na kamenivo jsou kladeny určité požadavky. Nesmí se smršťovat, ani měnit své mechanické vlastnosti. Jako plnivo do betonu je zcela nevhodné použít žulu, která se při působení vysoké teploty smršťuje nebo křemenné kamenivo, které naopak svůj objem zvětšuje. Pro výrobu žárobetonů vystaveným teplotám vyšším $700 \text{ }^\circ\text{C}$ se používá kamenivo umělé, např. drcený keramický střep nebo drcená pomalu chlazená struska. Plnivem pro žárobetony odolávající teplotám nad $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ je drcený šamot, korund, drcený bauxit, chromit nebo karborundum.

Nejen kamenivo, ale i hydraulické pojivo je složka, které je třeba věnovat velkou pozornost při volbě materiálů pro vhodné složení žárobetonu. Optimálním pojivem je směsný cement s malým obsahem portlandského slínku, jehož součástí jsou příměsi na bázi strusky nebo popílku. Nejvhodnějším pojivem je hlinitanový cement. Naopak nejméně vhodné je použití čistého portlandského cementu, neboť vlivem působení vysoké teploty podléhá degradaci (ztráta chemicky vázané vody vede k jeho rozkladu). Pomocí elektrérenského popílku, jemně mleté vysokopecní

strusky, šamotového prachu, jemného cihlářského prachu nebo jemně mletého chromitu můžeme odolnost betonu působení vysokých teplot ještě zvýšit. [27]



Obrázek 12 Rozdělení žárobetonů [28]

4.2 HLINITOKŘEMIČITÉ MATERIÁLY

Hlavní složkou těchto materiálů je oxid křemičitý SiO_2 a oxid hlinitý Al_2O_3 . Dále obsahují doprovodné oxidy Fe_2O_3 , CaO , K_2O , Na_2O , TiO_2 .

Hlinitokřemičité výrobky	
Vysocehlinité	Al_2O_3 45 - 100 %
Šamotové	Al_2O_3 30 - 45 %
Šamot s nízkým obsahem Al_2O_3	Al_2O_3 10 - 30 %, SiO_2 do 85 %
Kyselý šamot	SiO_2 85 - 93 %
Dinas	SiO_2 více než 93 %

Obrázek 13 Rozdělení hlinitokřemičitých materiálů [28]

5 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ TEPELNÉHO ZÁSOBNÍKU

Tepelný zásobník sestává z akumulčního jádra, izolace a pláště. Nutné je zabývat se i tvarem takového zásobníku, který bude vykazovat co nejnižší ztráty a zároveň bude možné jej bez větších potíží vyrobit. Nejnižší ztrátovost vykazuje tvar koule. Ovšem vyrobit tepelný zásobník ve tvaru koule není nic jednoduchého, proto se dalším vhodným tvarem nabízí válec a poměru výšky k průměru 1:1.

U senzibilních vysokokapacitních zásobníků je třeba věnovat značnou pozornost izolační vrstvě. Akumulační jádro tepelného zásobníku musí v období s vysokou sluneční intenzitou akumulovat a uchovat značné množství tepelné energie, kterou bude stavební objekt zásobován po dobu celého kalendářního roku. Aby bylo možné tuto myšlenku realizovat, musí tepelně akumulční jádro zásobníku pracovat při teplotách vysokých až 800 °C, a právě proto zásobník vyžaduje tepelnou izolaci odolávající vysokým teplotám. Ne všechny materiály přenášejí teplo stejně, a právě součinitel tepelné vodivosti je fyzikální charakteristika popisující tuto významnou materiálovou vlastnost. Čím nižší hodnota součinitele tepelné vodivosti, tím méně daný materiál vede teplo. Tepelně izolační materiály disponují malou tepelnou vodivostí, zatímco tepelně vodivé materiály mají tepelnou vodivost vysokou. Tepelně akumulční jádro musí být opláštěno materiálem vykazující nízkou hodnotou součinitele tepelné vodivosti, aby docházelo k co nejnižším tepelným ztrátám. Těmto podmínkám vyhovuje expandovaný perlit, kalcium silikátové izolace nebo mikroporézní izolační materiály.

Perlit je ryolitová vulkanická sklovina vznikající v důsledku náhlého ochlazení lávy ve vodním prostředí. Perlit se vyznačuje schopností až pětinasobného zvětšování objemu následkem pražení v teplotě 850 – 1150 °C a dochází tedy ke vzniku expandovaného perlitu. Jedná se o materiál se zrnitou strukturou, který má bílé až tmavě šedé zbarvení, relativně velký obsah alkalických látek a nízký obsah kyslíčnicků železa a titanu. Mezi další vlastnosti, pro které je perlit pro nás významný patří nízký součinitel tepelné vodivosti a nehořlavost. Své vlastnosti uchovává v rozsahu teplot od -200 do +900 °C. Expandovaný perlit vyniká svou nízkou hodnotou součinitele tepelné vodivosti 0,05 W/Km. Značnou nevýhodou tohoto

materiálu je fakt, že při zvyšování teploty poměrně rychle roste i jeho hodnota součinitele tepelné vodivosti. [15]

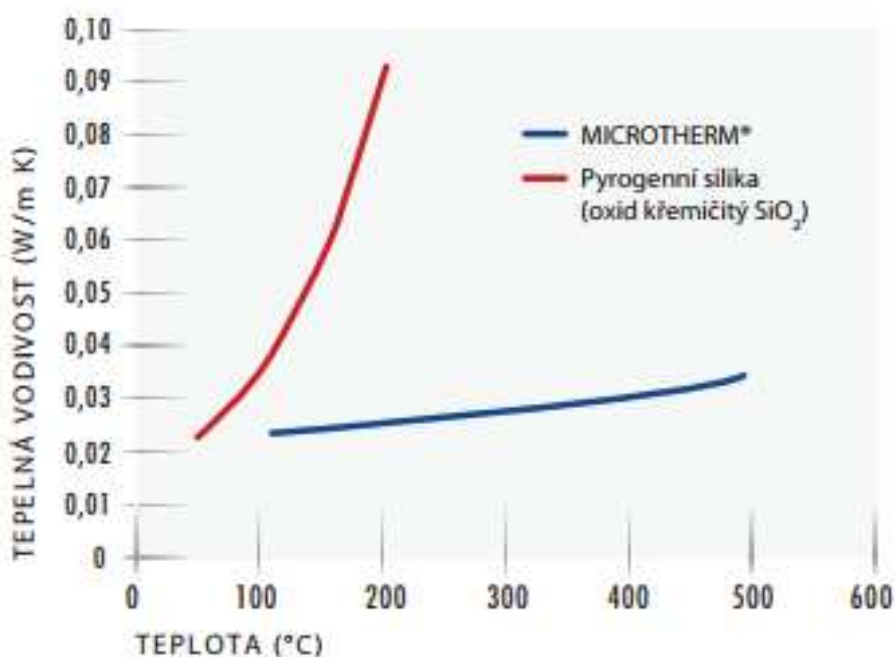
Kalcium silikátové materiály se vyrábějí hydrotermální syntézou vodní suspenze vápna a jemného křemičitého písku s přidavkem plniva a výztuže. Výpalem dochází ke vzniku bezvodého wollastonitu $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, který slouží jako aditivní složka zvyšující odolnost proti vysokým teplotám. Charakteristickými vlastnostmi tohoto materiálu jsou nízká objemová hmotnost a vysoká tepelné izolační schopnost. [16], [17]

Mikroporézní izolační materiály se vyznačují extrémně nízkými hodnotami tepelné vodivosti, které jsou nižší než u klidného vzduchu. Mikroporézní materiál obsahuje velmi malé póry o velikosti menší než 100 nm. Průměr pórů je tedy menší než volná dráha rozkmitu molekul vzduchu, čímž je výrazně zhoršen přenos tepla konvekci a u pevné fáze kondukcí. Hlavními složkami těchto materiálů jsou pyrolitický oxid křemičitý, oxid titaničitý a aditiva. Lisováním práškové směsi se vyrábí desky a tvarové části, které jsou dále zpracovávány. [18], [19]

Při mikroporézním efektu dochází k potlačení srážek molekul vzduchu, které by vedly k přenosu tepla vedením v plynech. Takový materiál vyniká velmi dobrými vlastnostmi jako je pevnost v tlaku, odolnost proti stlačení a nízká objemová hmotnost. Asi z 90 % je tento materiál tvořen zachyceným vzduchem, dále jej tvoří nanočástice siliky tlakově vázané do dlouhých, klikatých řetězců. Vzduch je v něm obsažen jako mikroskopické kapsy ve struktuře, které jsou menší než střední volná dráha molekuly vzduchu. Takto tvořená porézní struktura významně omezuje efekt vedení v plynech a interní konvekci. Molekuly vzduchu se nesrážejí s ostatními molekulami vzduchu, ale se stěnami pórů. Tento proces se vyznačuje přenosem jen málo energie. Vedení pevnými látkami je minimalizováno nízkou objemovou hmotností i drobnou strukturou částic. Důsledkem velmi malé kontaktní plochy mezi jednotlivými částicemi, společně s délkou řetězce částice dochází k omezení přenosu tepla kontaktem pevné fáze. Vodivost v plynné fázi je omezena stlačením mikroporézních řetězců na optimální objemovou hmotnost, při které jsou póry v materiálu menší, než je střední volná dráha molekul vzduchu. Takové uspořádání brání molekulám uzavřeného vzduchu ve srážkách a volném pohybu. Tento způsob omezuje schopnost plynu vést teplo. Tedy čím vyšší je objemová hmotnost, tím více

částic a tím vyšší tepelná vodivost – vedení v pevné fázi. Čím je nižší objemová hmotnost, tím jsou větší póry, a tedy vyšší tepelná vodivost - vedení v plynné fázi). Vyváženým vztahem mezi vedením v plynné a pevné fázi je možné získat optimální hodnotu tepelné vodivosti pro optimální účinnost mikroporézního výrobku [20].

Sálání je hlavním způsobem přenosu tepla za vyšších teplot a je příčinou rychlého zhoršování vlastností tradičních izolačních materiálů za těchto podmínek. Začleněním částic opacifikujícího materiálu do struktury mikroporézního materiálu dochází k jeho téměř úplné opaknosti pro infračervené záření. Opacifikační látka opakovaně láme infračervené vlny a tím téměř zcela blokuje jejich průchod izolací. V důsledku těchto procesů má takový materiál nižší tepelnou vodivost než klidný vzduch.



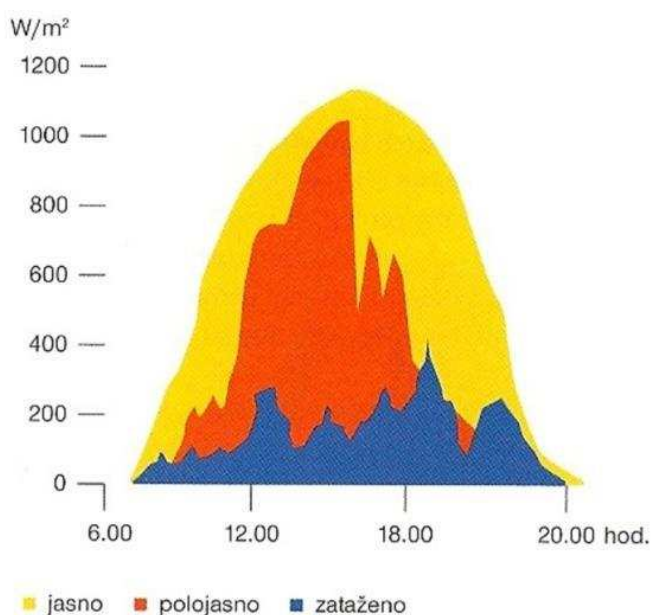
Obrázek 14 Závislost tepelné vodivosti na teplotě [21]

Tab. 3 *Přehled vlastností izolačních materiálů vhodných pro konstrukci tepelného zásobníku*

Typ izolačního materiálu	Klasifikační teplota [°C]	Součinitel tepelné vodivosti [W/mK] při 600 °C	Objemová hmotnost [kg/m³]
Expandovaný perlit	1000	0,2	150
PROMASIL - 1000	1000	0,145	245
PROMASIL - 1000P	1000	0,145	285
PROMASIL - 1100	1100	0,145	285
PROMASIL - 1000L	1000	0,126	300
PROMASIL - 1100 SUPER	1000	0,101	300
MICROTHERM PANEL - 1000R	1000	0,031	240
MICROTHERM PANEL - 1000 HY	1000	0,031	260
MICROTHERM PANEL - 1200	1200	0,039	400
MICROTHERM SLIM&LIGHT	1000	0,031	260
STEELEX - 1000X	1000	0,03	360
STEELEX - 1100	1100	0,049	430
STEELEX - 1200	1200	0,039	450
MICROTHERM SLATTED - 1000R HY	1000	0,035	240
MICROTHERM SLATTED - 1000R	1000	0,035	260
PROMALIGHT-1000X	1000	0,03	280
PROMALIGHT-1000R	1000	0,029	320
PROMALIGHT-1200	1200	0,039	420

6 NÁVRH VELIKOSTI SOLÁRNÍHO KOLEKTORU A POTŘEBNÉHO OBJEMU AKUMULAČNÍHO JÁDRA TEPELNÉHO ZÁSOBNÍKU

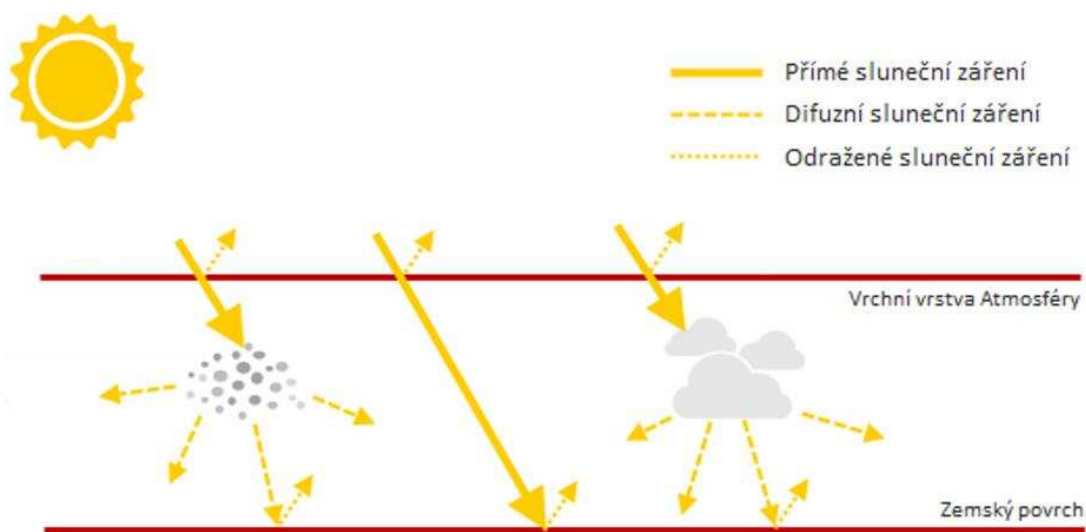
Jak již bylo zmíněno dříve, tepelný zásobník akumuluje tepelnou energii, uchová ji pro pozdější využití a umožní tak překonat nerovnoměrnost mezi výrobou a spotřebou. Slunce je přírodní zdroj energie, u kterého nelze předem přesně stanovit jeho chování, tedy především intenzitu záření a počet hodin slunečního svitu v jednotlivých ročních obdobích, případně i součinitel znečištění atmosféry. Intenzita záření a počet hodin slunečního svitu v jednotlivých ročních obdobích jsou z hlediska využívání solární energie nejdůležitějšími faktory. Solární energie je rozptýlená (málo koncentrovaná) a její dostupnost je závislá především na počasí a ročním období. Při jasné a zcela bezmračné obloze dopadá největší část slunečního záření na Zemi bez změny směru.



Obrázek 15 *Denní průběh záření ve střední Evropě (duben) [12]*

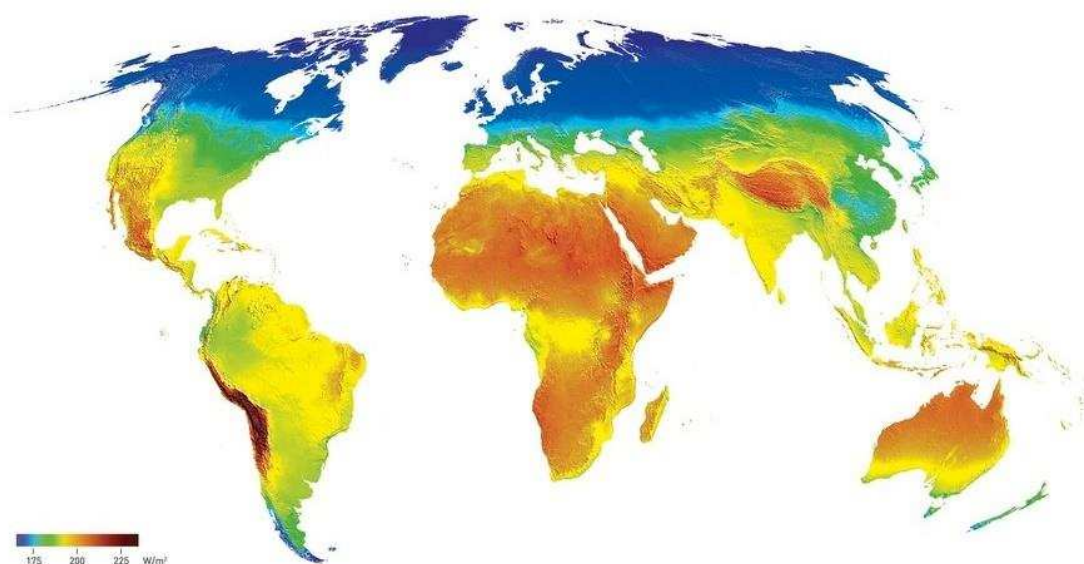
Toto záření je označováno jako přímé. Rozptylem přímého záření v mracích a na částech v atmosféře vzniká záření difúzní dopadající na Zemi ze všech směrů. Součet intenzity přímého a difúzního záření je označován jako globální sluneční

záření.



Obrázek 16 Složky slunečního záření dopadající na zemský povrch

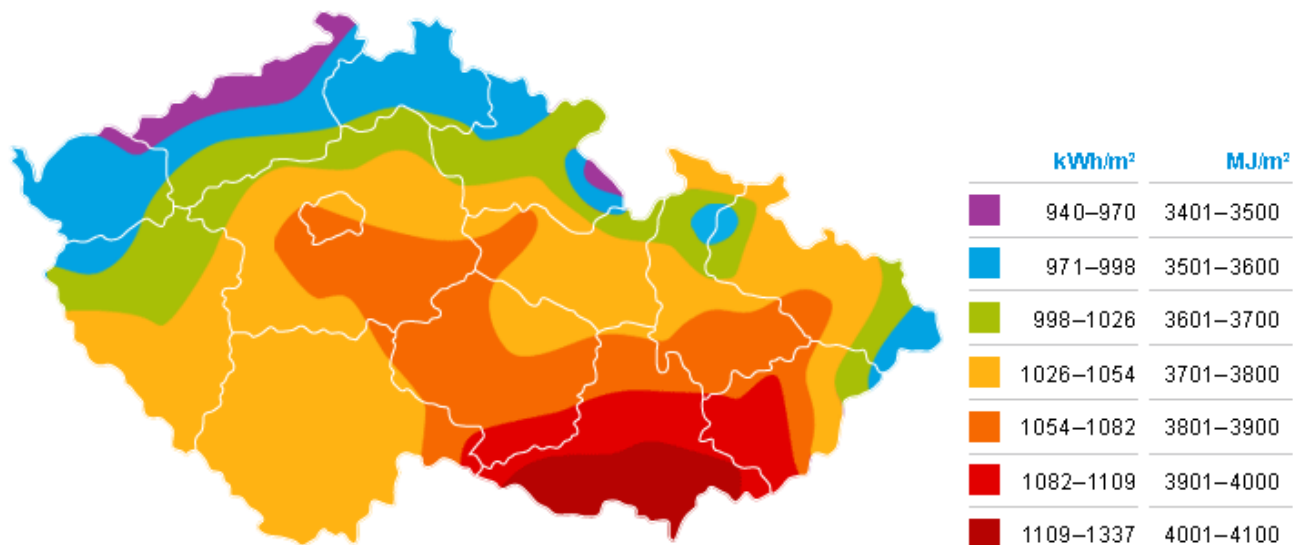
V důsledku pohybu Země po oběžné dráze a jeho rotaci kolem osy dochází během dne a roku ke změně polohy Slunce. Důsledkem toho dochází i ke změně délky dne a noci během roku a ke změně denní teploty. Tyto změny mají klíčový význam pro množství dopadajícího slunečního záření. Na obrázku je znázorněn průměrný roční úhrn globálního slunečního záření ve světě.



Obrázek 17 Roční průměrná intenzita globálního slunečního záření ve světě [W/m^2] [14]

Z obrázku je patrné, že sluneční energie dopadající na zemský povrch je nerovnoměrně rozptýlena. Nejméně sluneční energie dopadá na povrch v oblasti

severního pólu, naopak v oblasti rovníku dopadá nejvíce záření. Na následujícím obrázku je znázorněno množství dopadajícího záření na zemský povrch.

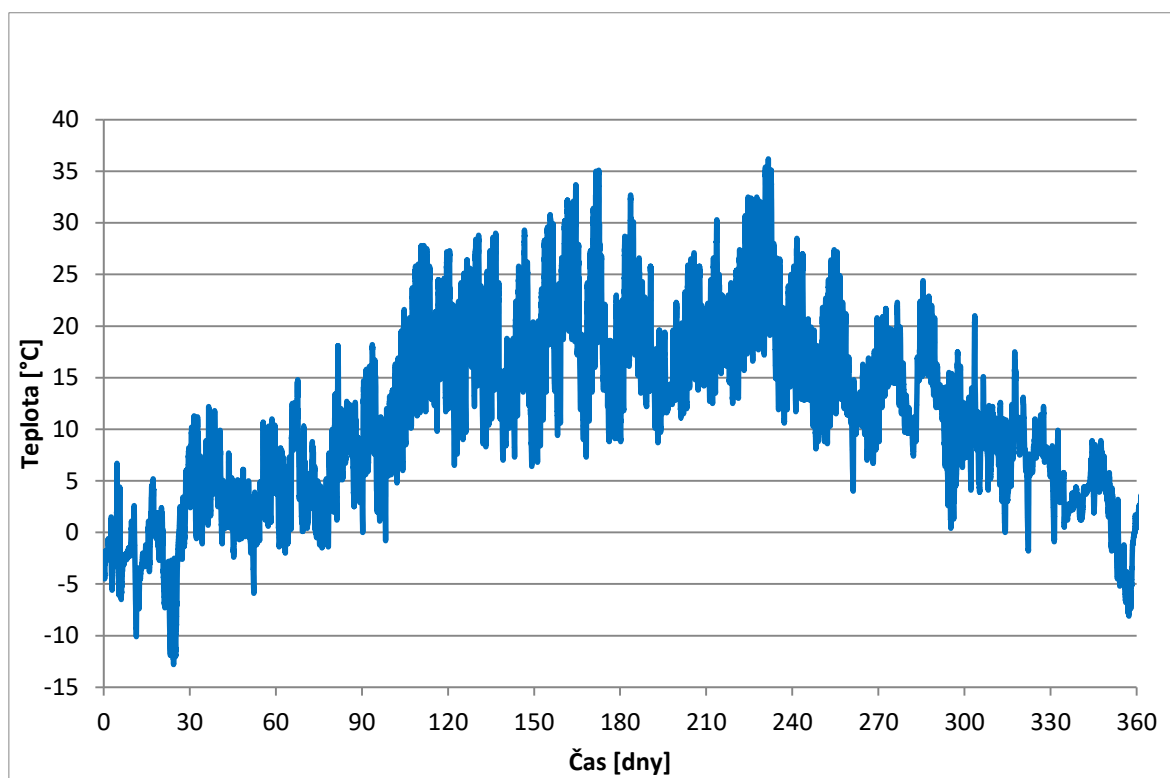


Obrázek 18 *Roční průměrný úhrn slunečního záření v ČR*
[kWh/m²] [13]

Na území České republiky dosahuje průměrná intenzita slunečního záření hodnoty kolem 620 W/m², výjimečně 1000 W/m².

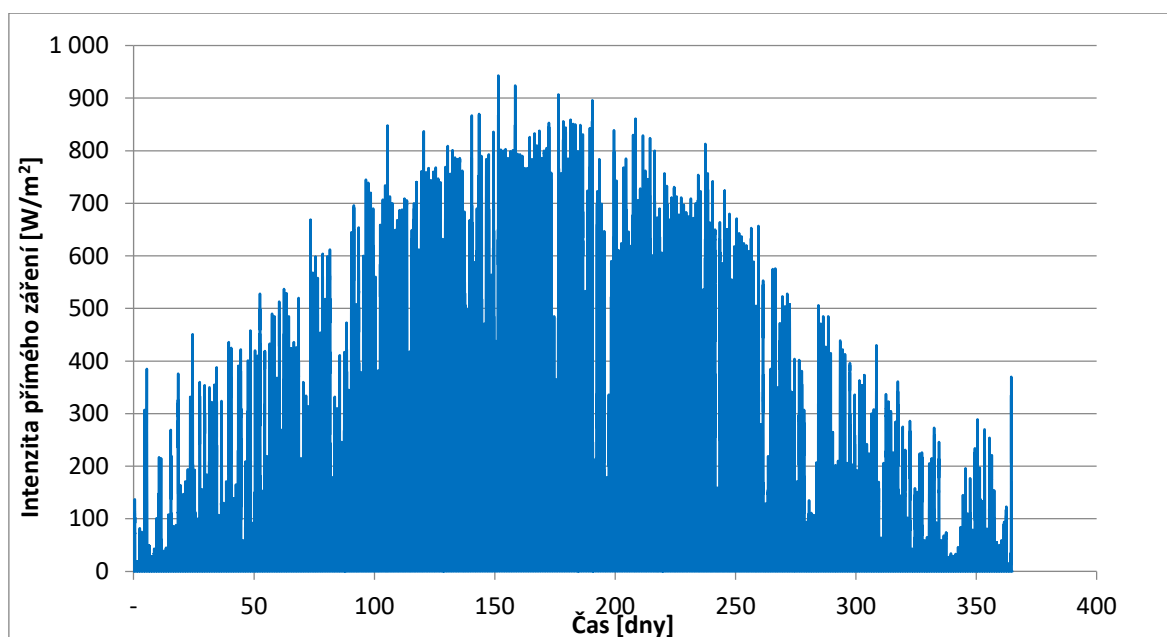
7 PRAKTICKÁ ČÁST

Slunce je přírodní zdroj tepelné energie, a tak nelze s přesností určit jeho chování v nadcházejících letech. Proto výpočet bilance potřeby energie pro stavební objekt vychází z průměrných klimatických dat naměřených v průběhu předešlých let. Na základě těchto hodnot lze předvídat, že klimatické podmínky budou v budoucnu podobné. Na následujícím grafu je vyobrazen průměrný roční průběh teplot v klimatických podmínkách Brna.



Obrázek 19 Průměrný roční průběh teplot v klimatických podmínkách Brna

Důležitým parametrem je intenzita slunečního záření během roku, kterou znázorňuje následující graf.



*Obrázek 20 Průměrný roční průběh intenzity přímého záření
v klimatických podmínkách Brna*

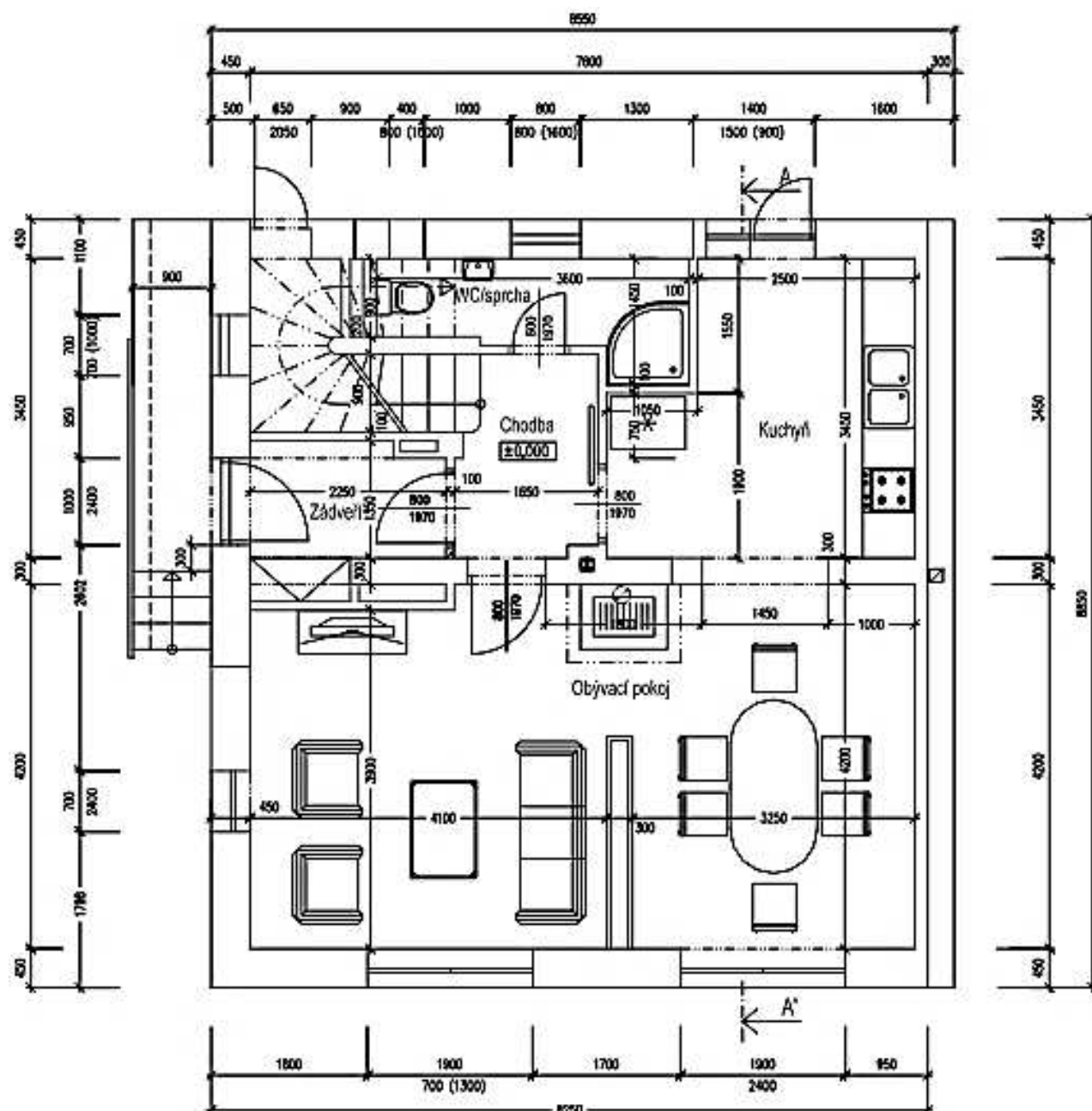
V období s vysokou sluneční intenzitou musí být akumulováno a uchováno takové množství tepelné energie, které vystačí na celý rok. Nejvyšší intenzitu slunečního záření vykazují letní měsíce. Na následujícím grafu je zachycena intenzita slunečního záření přímé složky.

V závislosti na intenzitě slunečního záření tedy lze získat různé množství sluneční energie. Hodnoty tepelné energie za jednotlivé měsíce jsou uvedeny v tabulce.

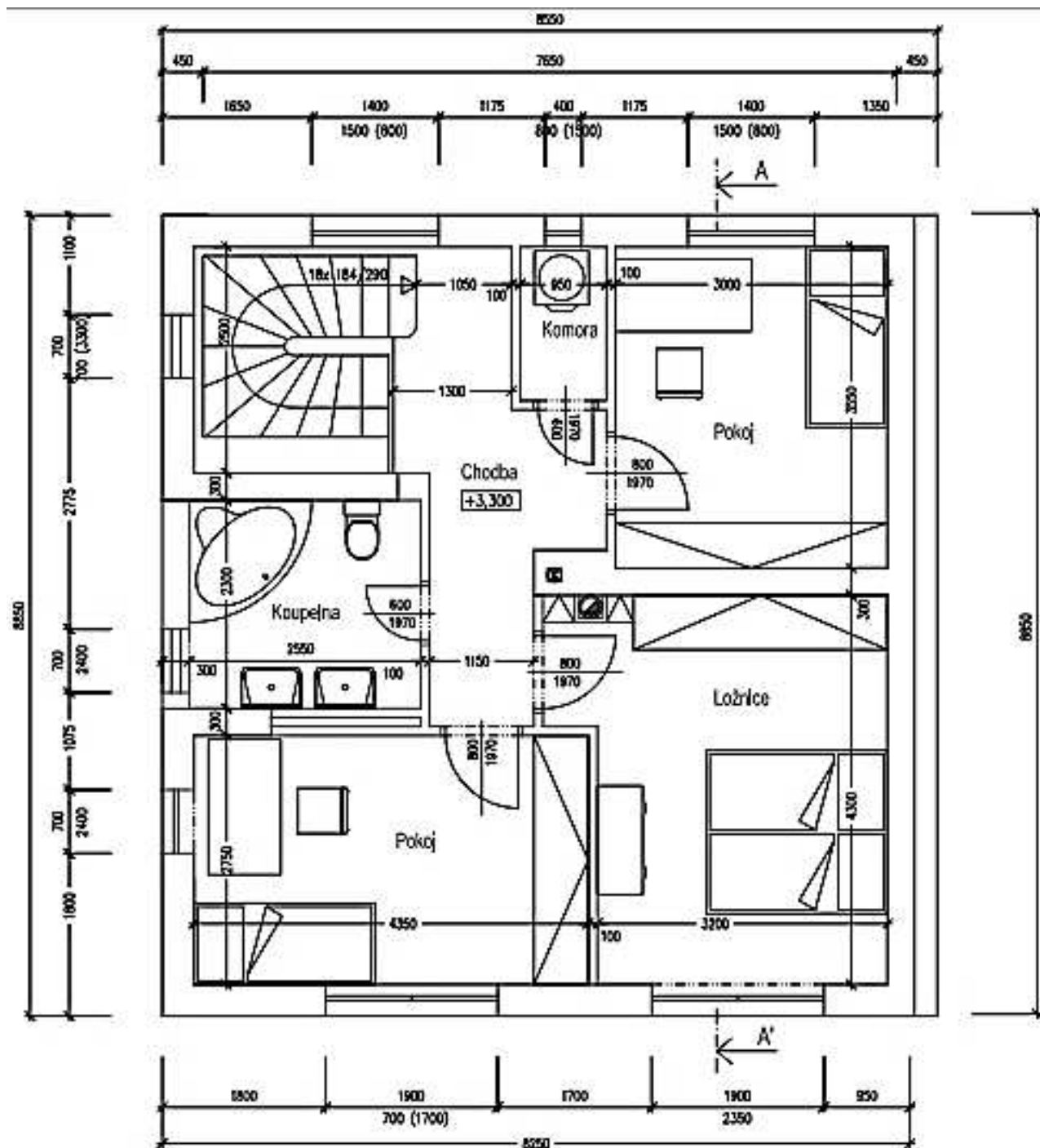
Tab. 4 Množství získané energie za daný měsíc na m²

Měsíc	Energie [MJ/m ²]	Energie [kWh/m ²]
Leden	66,06	18,35
Únor	128,51	35,69
Březen	286,57	79,60
Duben	460,76	127,98
Květen	585,70	162,69
Červen	625,35	173,70
Červenec	405,93	112,75
Srpen	494,92	137,47
Září	312,35	86,76
Říjen	157,60	43,77
Listopad	91,00	25,27
Prosinec	45,44	12,62
Energie přijatá za rok	3660,19	1016,65

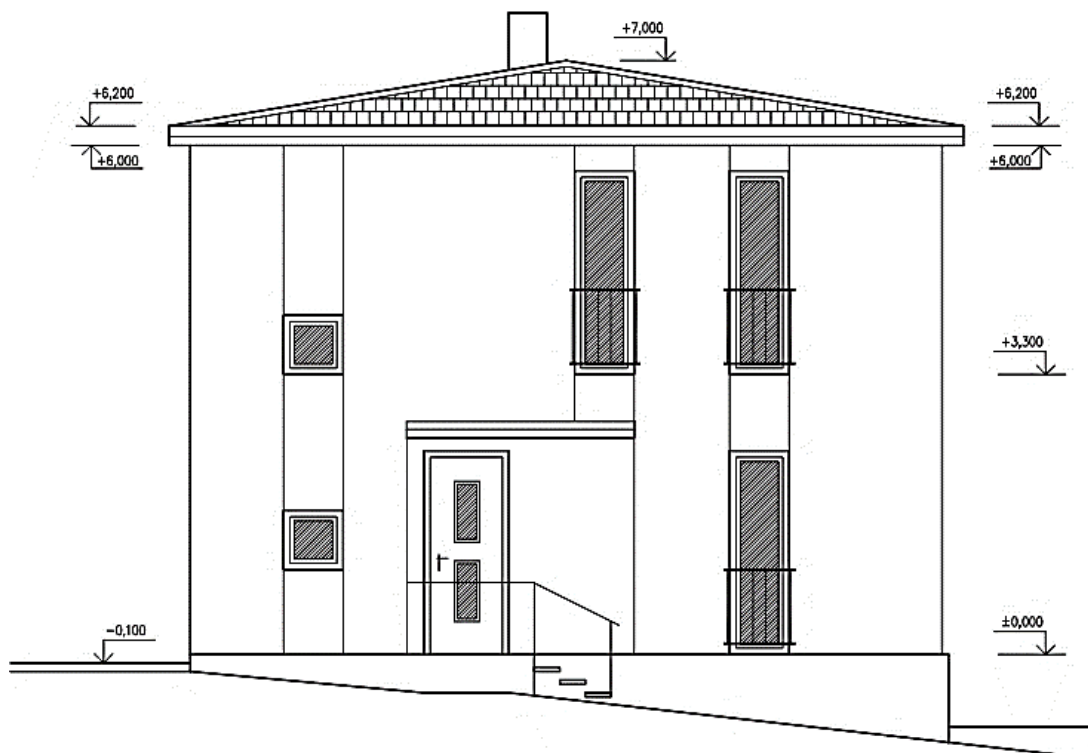
Objekt, který byl vybrán k simulaci velikosti zásobníku se nachází v Mikulově, přibližně 60 km jižně od Brna. V této oblasti mohou být mírně odlišné klimatické podmínky, ovšem k provedení návrhu budou postačující. Vybraným objektem je dvou poschodový rodinný zděný dům se sedlovou střechou.



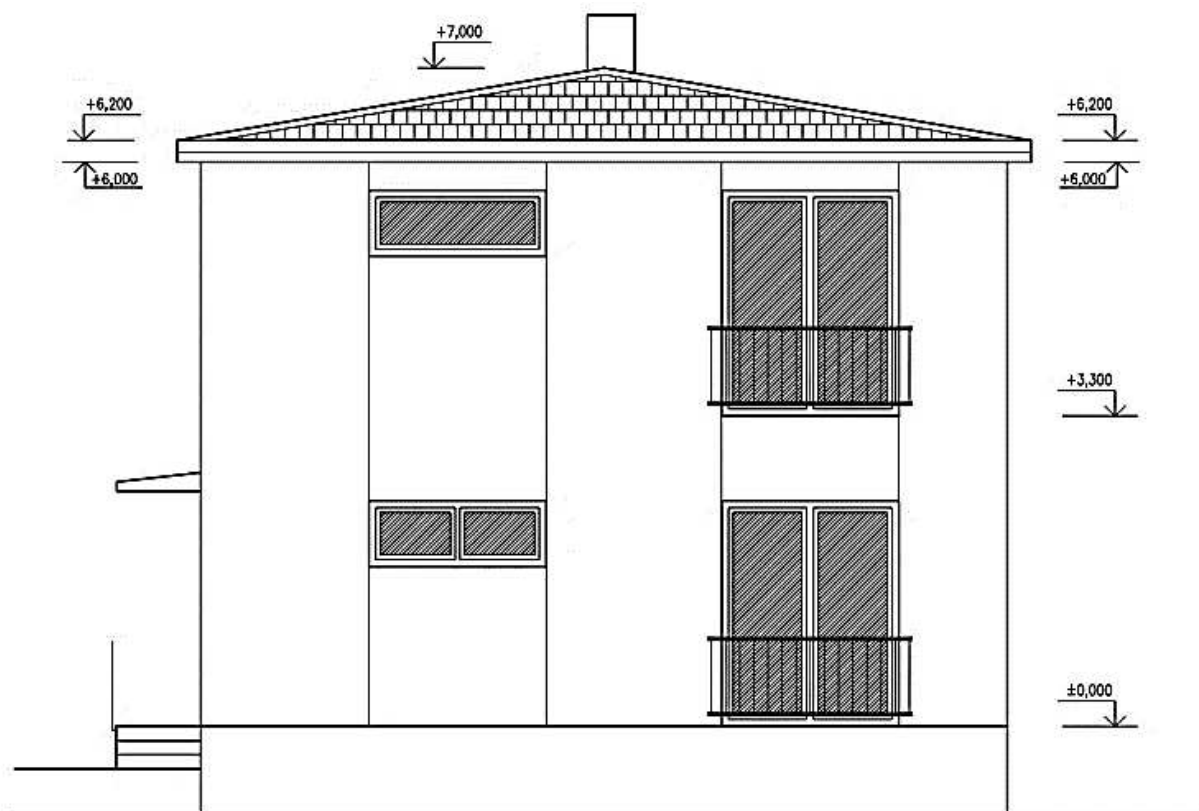
Obrázek 21 Půdorys 1.NP vybraného objektu



Obrázek 22 Půdorys 2.NP vybraného objektu

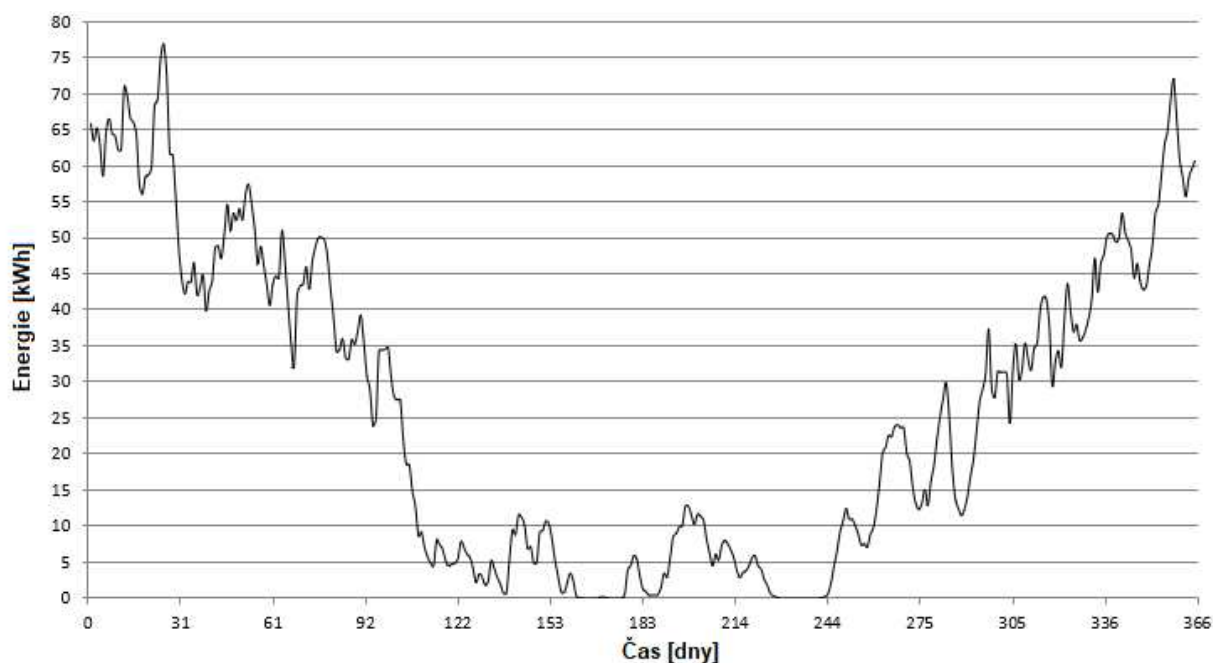


Obrázek 23 Pohled vybraného objektu – jihozápad



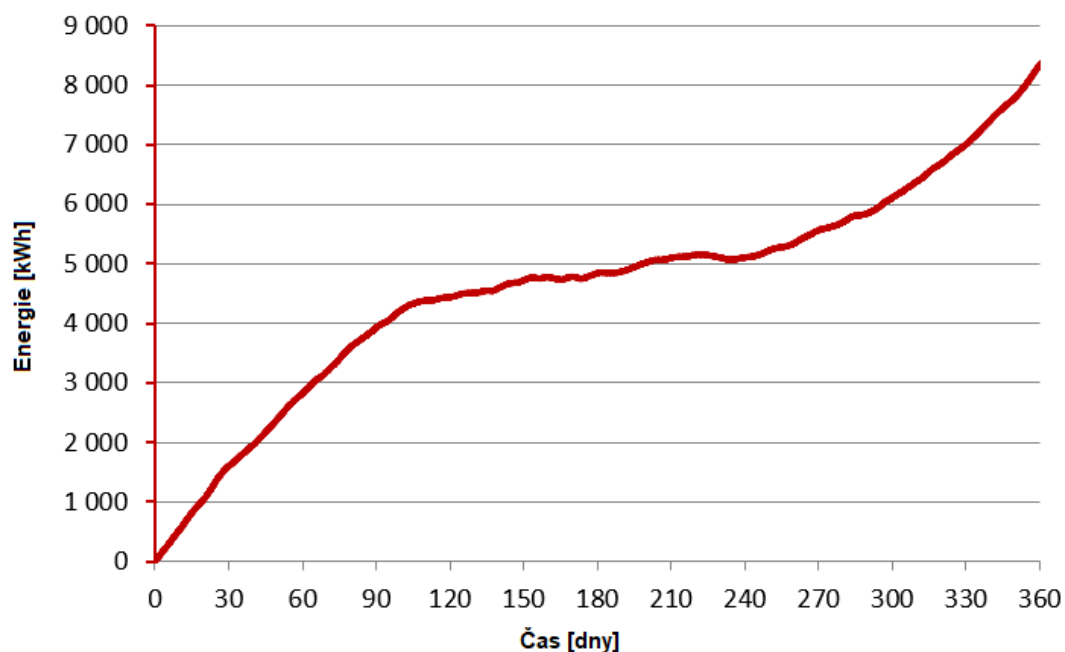
Obrázek 24 Pohled vybraného objektu – jihovýchod

Výpočtem byly určeny hodnoty průměrné denní spotřeby energie, které slouží jako vstupní informace pro výpočet velikosti akumulčního jádra zásobníku. Každá stavební konstrukce objektu byla definována pomocí vrstev, které ji tvoří a jejich materiálových vlastností. Dále byl uvažován i sklon a orientace ke světovým stranám. Každá místnost vykazuje rozdílnou teplotu pro docílení tepelné pohody. Potřebná energie, kterou je třeba dodat do objektu závisí na mnoha parametrech, mezi které patří zejména lokalita umístění stavebního objektu, orientace ke světovým stranám a konstrukční uspořádání objektu (rozměry místností, rozměry svislých a vodorovných konstrukcí a jejich materiálová charakteristika). Pomocí výpočetního programu „Energie“ byl vytvořen datový soubor, který poskytuje informace o potřebě energie na vytápění stavebního objektu pro jednotlivé dny roku z hlediska okrajových podmínek referenčního klimatického roku.



*Obrázek 25 Graf znázorňující potřeba energie na vytápění domu
E (kWh) pro jednotlivé dny roku z hlediska okrajových podmínek
referenčního klimatického roku*

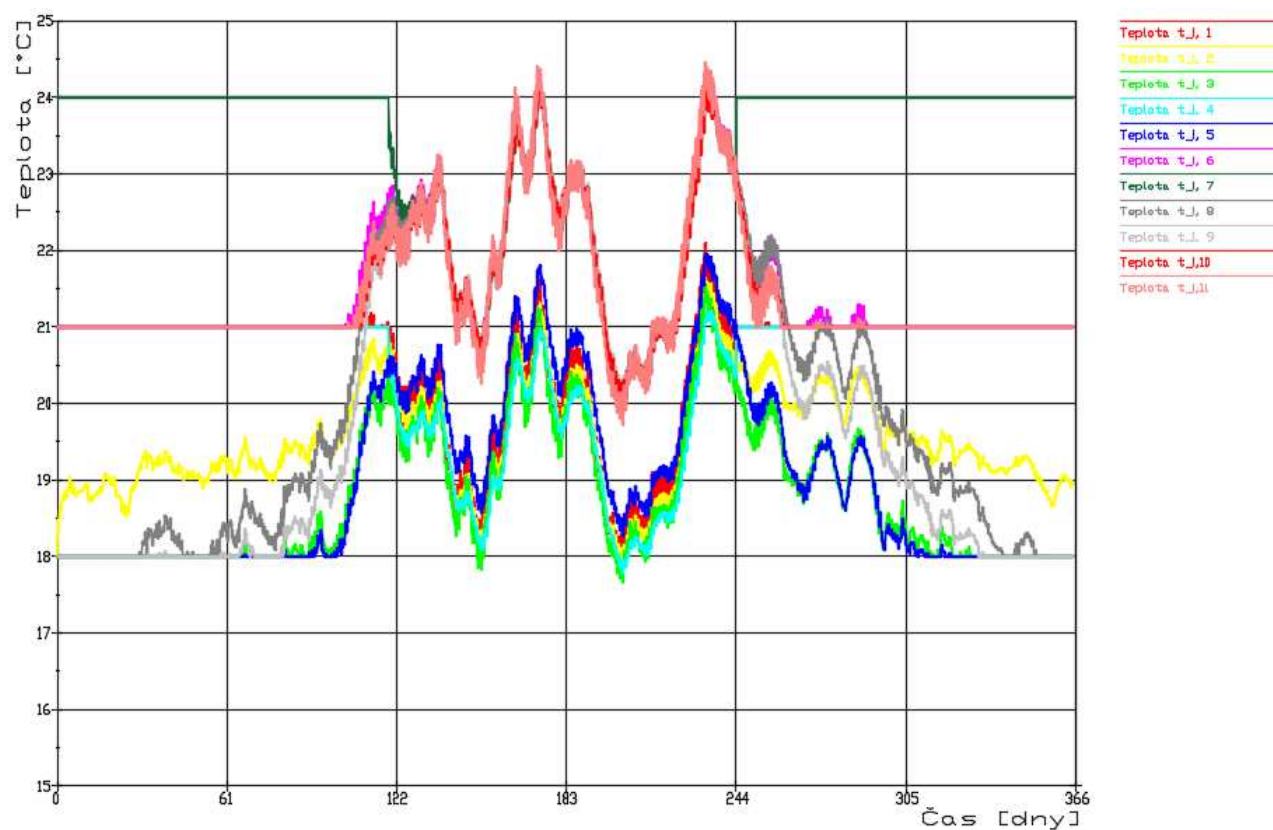
Na dalším je grafu je znázorněna zvyšující se závislost potřeby energie v průběhu roku. Celková energie potřebná pro vytápění objektu za celý rok činí 8,6 MWh.



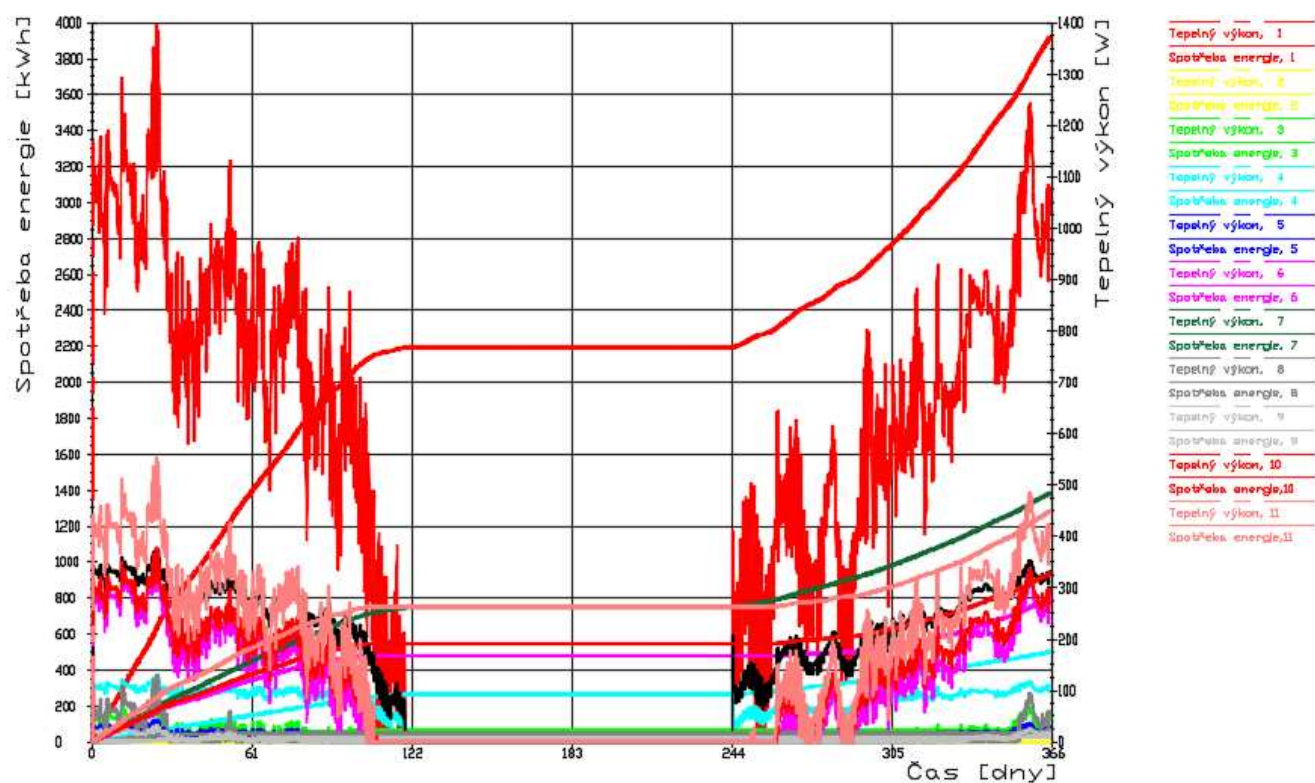
Obrázek 26 Graf znázorňující časovou závislost zvyšující se potřeby energie v průběhu roku

Nultý den v grafu připadá na 1.února. Z grafu je patrné, že k nejvyšší spotřebě energie dochází v zimním období. Naopak v letním období je spotřeba energie minimální.

Dalším výstupem programu Energie jsou grafy znázorňující průběh teplot, spotřebu energie a tepelný výkon v jednotlivých místnostech během celého roku.



Obrázek 27 Graf průběhu teplot v jednotlivých místnostech během roku



Obrázek 28 Graf průběhu spotřeby energie a tepelného výkonu v jednotlivých místnostech během roku

Pro výpočet velikosti akumulčního jádra zásobníku pomocí výpočtového programu „Energie“ byly zvoleny následující parametry:

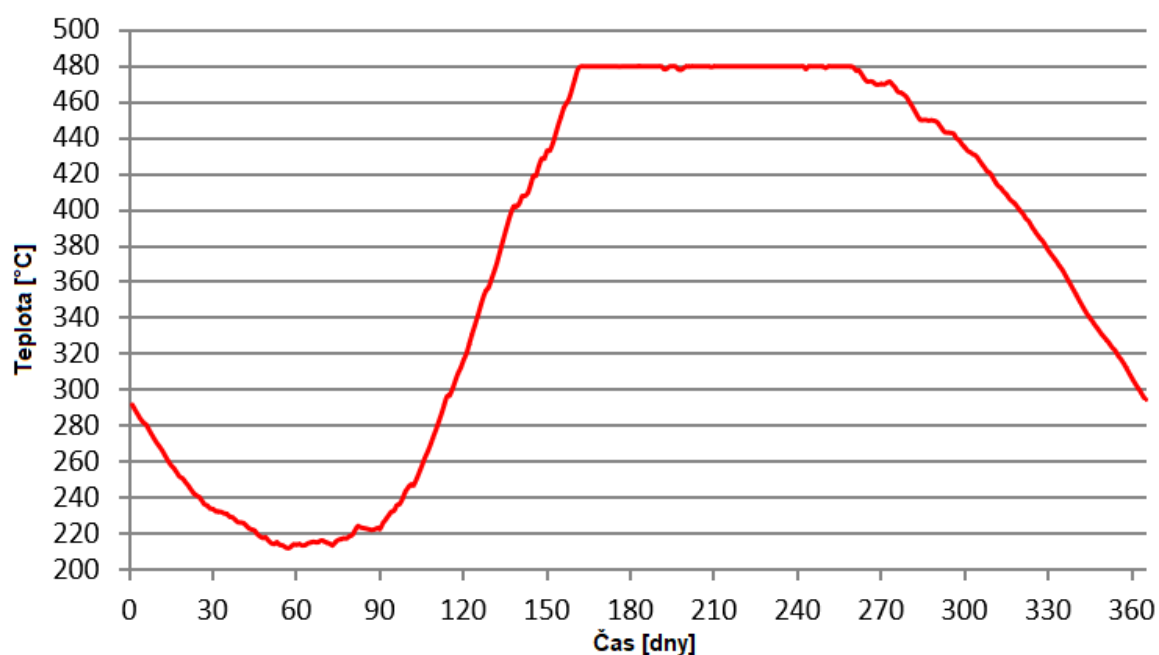
Poloměr $r = 2 \text{ m}$

Výška $h = 4 \text{ m}$

Tepelná kapacita $c = 1000 \text{ J/kg.K}$

Velikost koncentrační plochy $S = 40 \text{ m}^2$

Při takto zvolených parametrech je průběh teplot v zásobníku následující:



Obrázek 29 Graf průběh teplot v akumulčním jádru zásobníku

8 MĚŘENÍ SOUČiniteLE TEPELNÉ VODIVOSTI

Součinitel tepelné vodivosti můžeme stanovit stacionárními i nestacionárními metodami. Kromě způsobu stanovení a vyhodnocení se od sebe tyto metody liší teplotním stavem zkušebního vzorku během měření.

Stacionární metody jsou charakterizovány ustáleným teplotním stavem. Mezi tyto metody řadíme Metodu desky, Metodu chráněné teplé desky, Metodu měřidla tepelného toku, Metodu válce a Metodu koule.

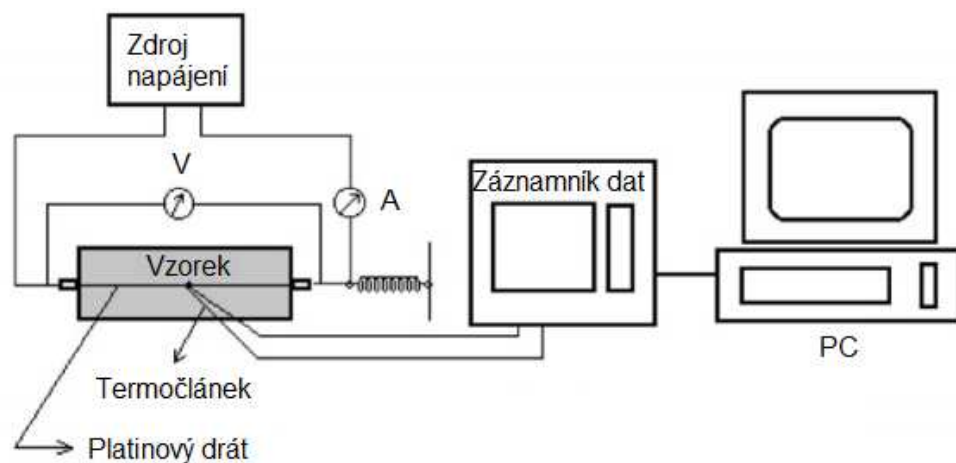
Nestacionární metody ustálený teplotní stav nevyžadují. Měření je založeno na sledování průběhu šíření teplotní vlny měřeným vzorkem. Tuto oblast zastupuje Metoda nestacionárního tepelného toku, Metody tepelných impulsů – Metoda horkého drátu, Záblesková metoda.

8.1 METODA TOPNÉHO DRÁTU

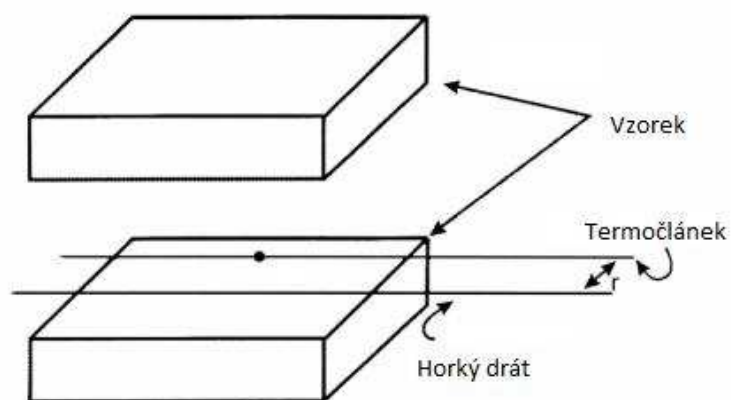
Metoda topného drátu v paralelním uspořádání patří mezi dynamické metody stanovení součinitele tepelné vodivosti. Podstatou zkoušky je stanovení teplotního nárůstu jako funkce času lineárního zdroje tepla (topného drátu) vloženého mezi dvě zkušební tělesa, která tvoří zkušební sestavu. Tato sestava je zahřívána v peci na definovanou teplotu, při které se udržuje. Další místní ohřev se uskutečňuje pomocí lineárního elektrického vodiče (topného drátu), symetricky uloženého do zkušební sestavy. Elektrickým vodičem protéká elektrický proud o známém výkonu, který je konstantní v čase a v podélném směru zkušební vzorku. Nárůst teploty je měřen a zaznamenáván od okamžiku zapojení lokálního topného proudu. Nárůst teploty probíhá logaritmicky. Z rychlosti nárůstu teploty a z přiváděného proudu se vypočítá tepelná vodivost zkušebních těles. U křížového uspořádání probíhá měření pomocí termočlánku, který je upevněn na střed topného drátu. Metoda je založena na předpokladu nekonečně dlouhého topného drátu, který je obklopen nekonečným a homogenním materiálem.

Tepelná vodivost materiálu se vypočte z následující rovnice:

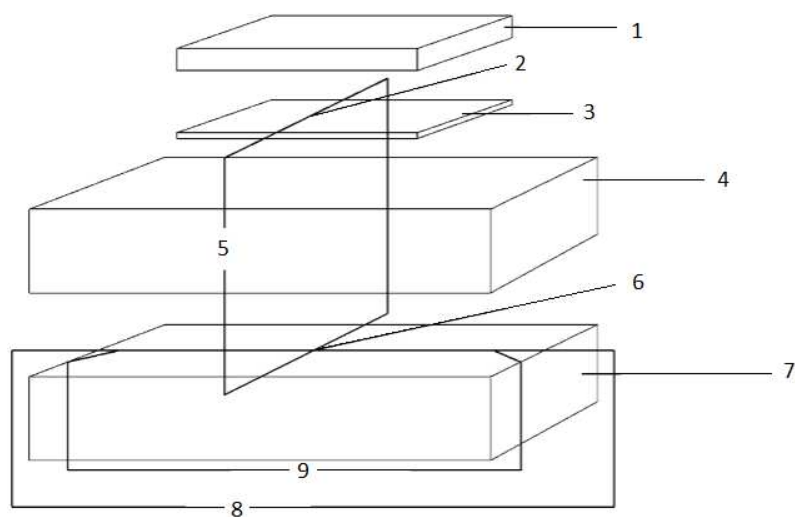
$$\lambda = \frac{P}{4\pi L} \times \frac{-Ei\left(\frac{-r^2}{4\alpha t}\right)}{\Delta\theta}$$



Obrázek 30 Schéma uspořádání měřícího zařízení [4]



Obrázek 31 Umístění horkého drátu a termočlánu



Obrázek 32 Umístění topného a měřícího obvodu s diferenčním termočlánekem pro křížové uspořádání [5]

Legenda k obrázku:

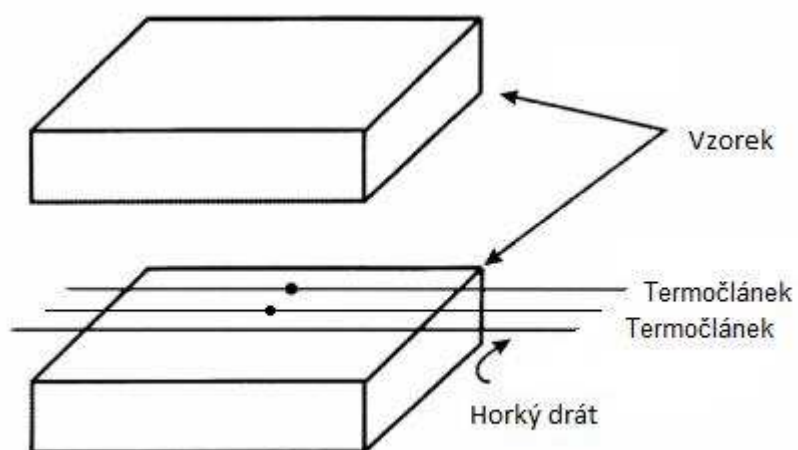
- 1 krycí vrstva
- 2 srovnávací termočlánek
- 3 izolační vrstva
- 4 zkušební těleso
- 5 diferenční měřící obvod
- 6 měřící termočlánek
- 7 zkušební těleso
- 8 topný obvod
- 9 napěťové odbočky

8.2 UPRAVENÁ METODA TOPNÉHO DRÁTU

Upravíme – li zkušební zařízení, můžeme pomocí výpočtu zjistit tepelné charakteristiky materiálu. K tomu je nutná znalost základních tepelných charakteristik materiálu závisících na jeho tepelně izolační a tepelně akumulační schopnosti, jako je tepelná vodivost, tepelná kapacita, popřípadě teplotní vodivost.

Teplotní průběh je měřen pomocí dvou termočlánků umístěných v různé vzdálenosti od topného drátu. Metoda umožňuje stanovit tepelnou a teplotní vodivost materiálu současně v rámci jednoho experimentu. Měření se ovšem musí provádět opakovaně pro různé provozní teploty, protože se mohou tyto dvě zmíněné charakteristiky ovlivňovat.

Rozdílné uspořádání zkušebního zařízení přináší obtíže, které značně ztěžují výpočet vztahů, které vedou ke zjištění tepelných charakteristik materiálu. Z jednoduchého výpočtového vzorce uvedeného v normě se stává složitý výpočetní vztah obsahující exponenciální integrály.



Obrázek 33 Umístění topného drátu a termočlánků – upravená metoda

9 PRAKTICKÁ ČÁST

Vlastnosti zkušebních těles byly měřeny pomocí upravené metody topného drátu. Na zkušební vzorek jsou umístěny termočlánky ve vzdálenosti 3 mm a 15 mm od topného drátu.



Obrázek 34 Fotografie umístění termočlánků v měřeném vzorku

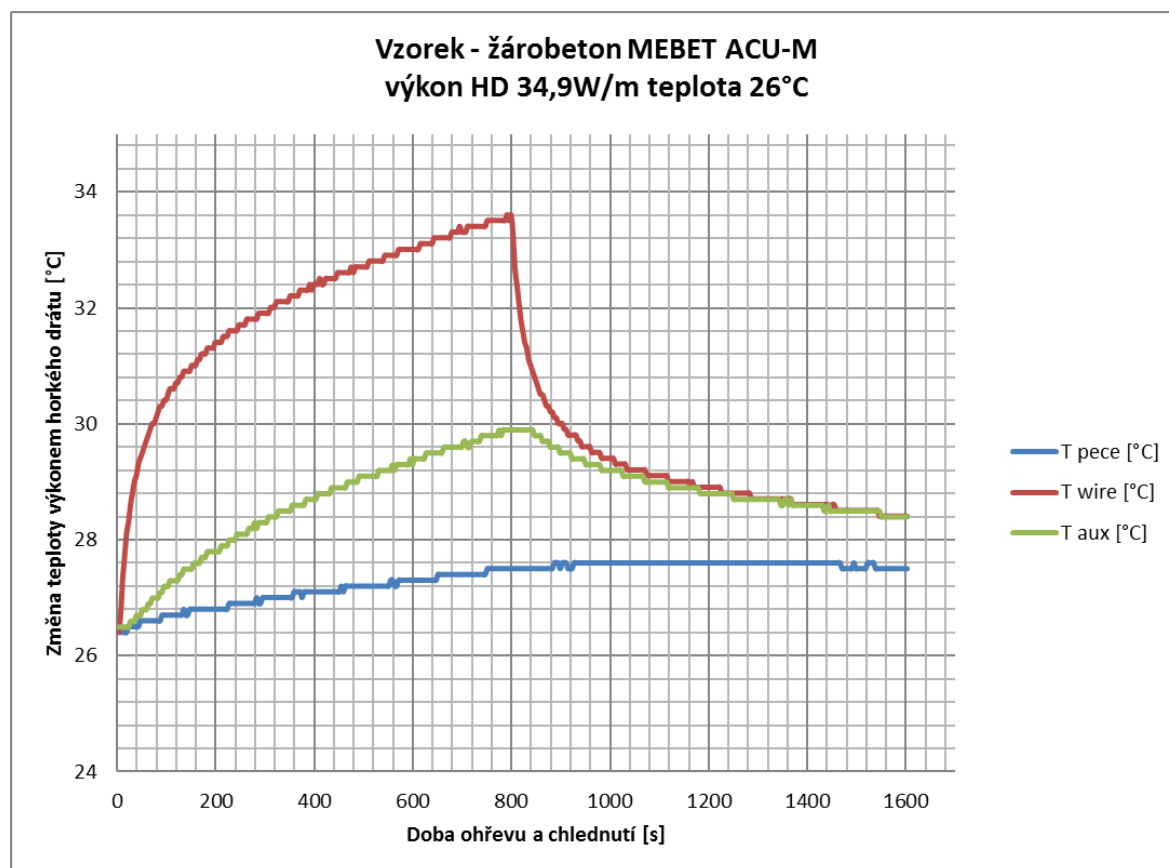


Obrázek 35 Fotografie umístění topného a měřícího obvodu

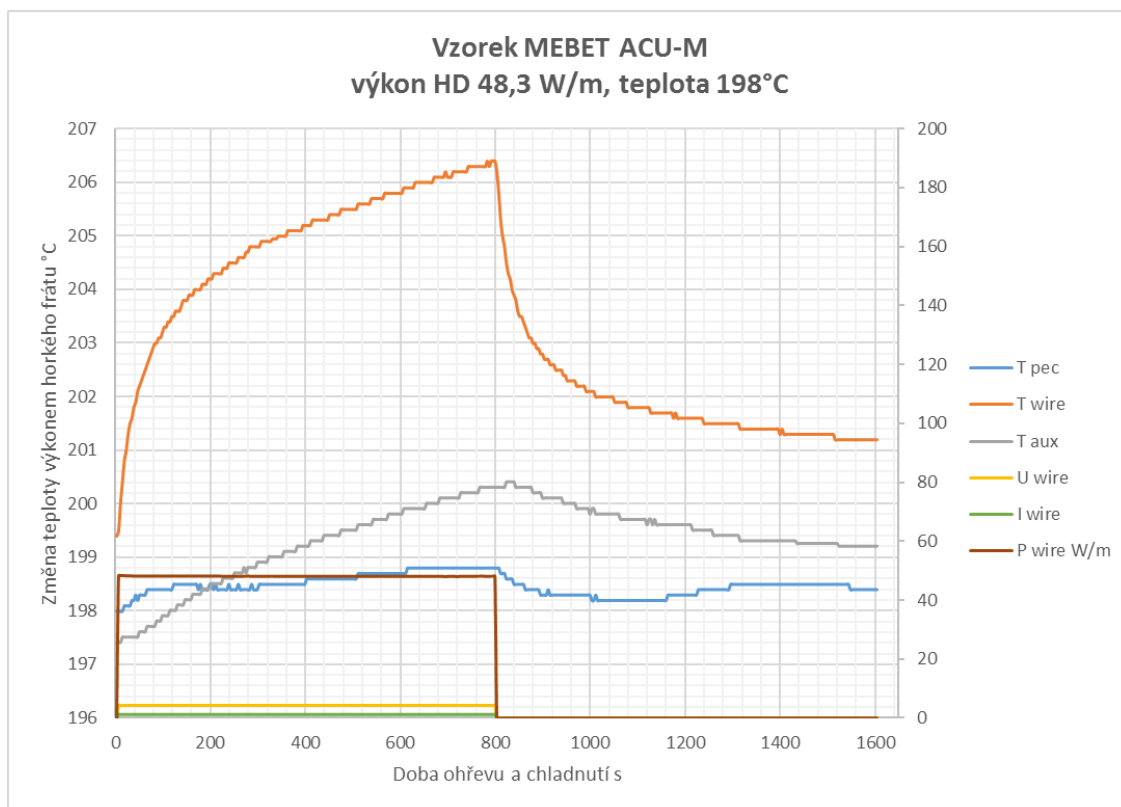
Zkušební vzorek je v peci temperován na požadovanou teplotu. Po vyrovnaní teplot v peci, kdy je teplota vzorku i pece konstantní, je spuštěno měření. Měření má dvě fáze. V první fázi je topným drátem přiváděn stabilizovaný elektrický proud o známém výkonu. V jeho okolí se šíří válcovitá teplotní vlna. V druhé fázi probíhá ustalování teplotní vlny, která vznikla lokálním ohřevem. Experiment je nastaven tak, že doba topení je stejná jako doba ustalování. Výsledek měření tvoří elektronické záznamy o velikosti topného výkonu topným drátem a teploty měřené v průběhu experimentu na obou termočláncích. V grafu 19 je vyobrazen průběh měřených údajů, zejména nárůst teplot obou termočlánců po dobu přivádění elektrického proudu do topného drátu a následně pokles teplot po dobu, kdy proud přiváděn není.

Následující grafy vyobrazují průběh teplot při měření zkušebních těles a jejich vyhodnocení.

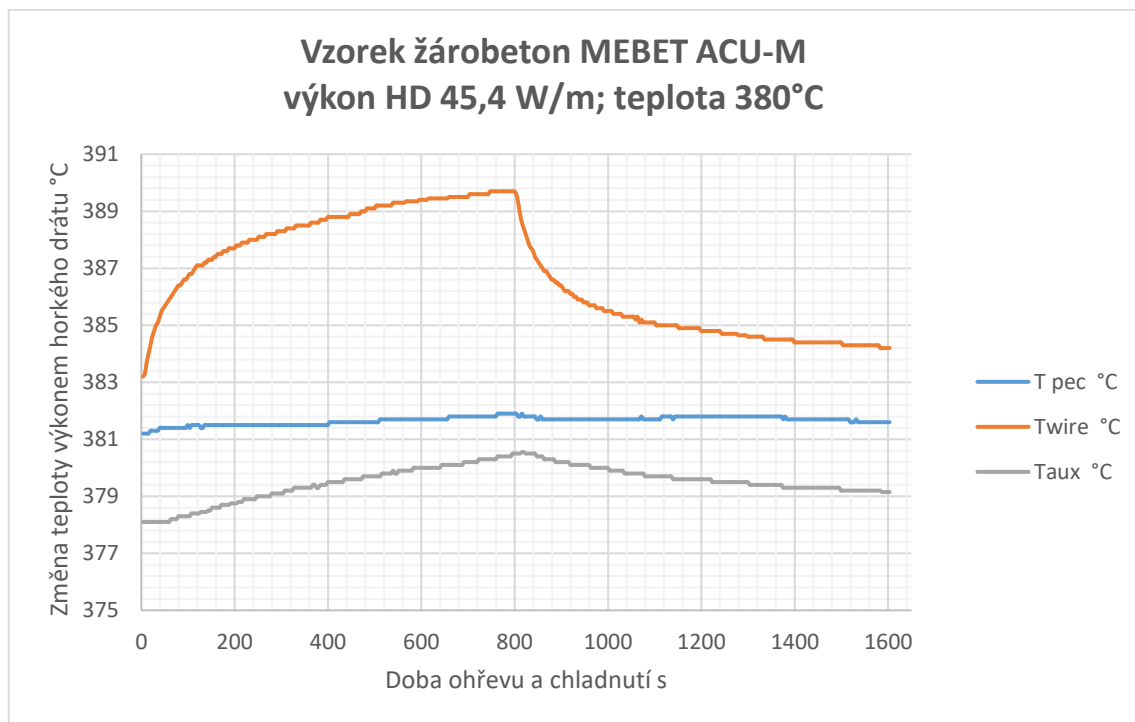
9.1 VZOREK – ŽÁROBETON MEBET ACU-M



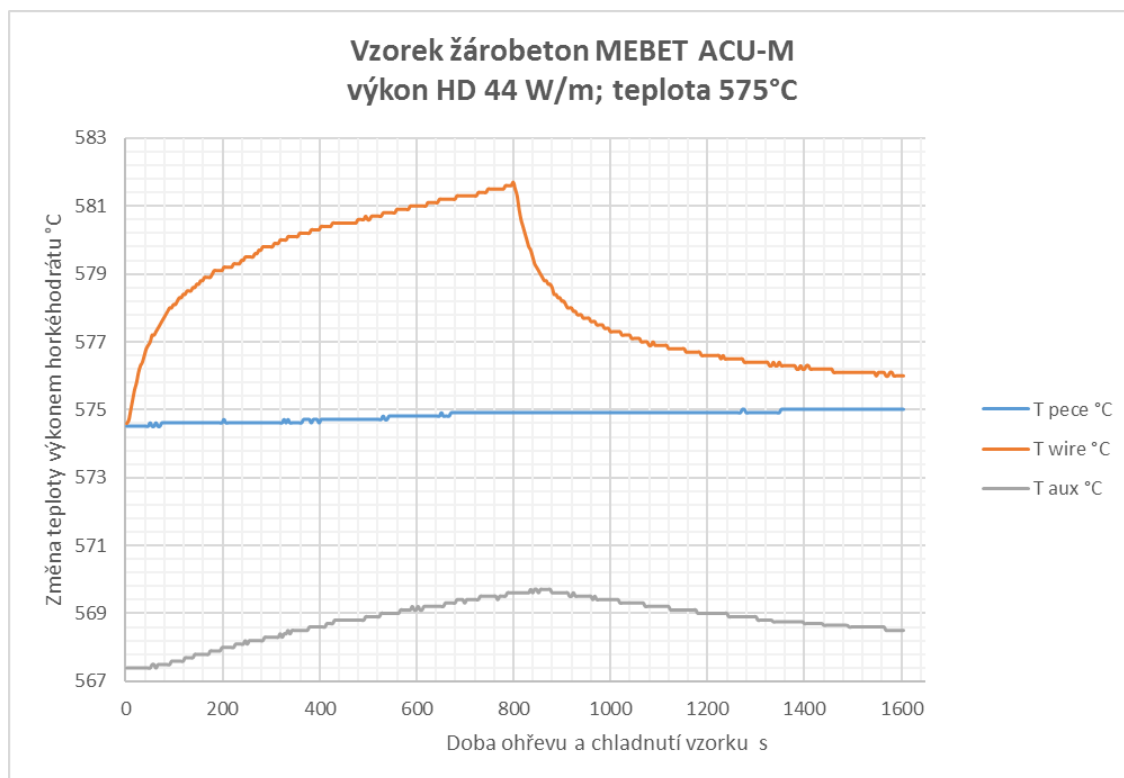
Obrázek 36 Graf průběhu zjištěných teplot při měření na teplotě 26 °C



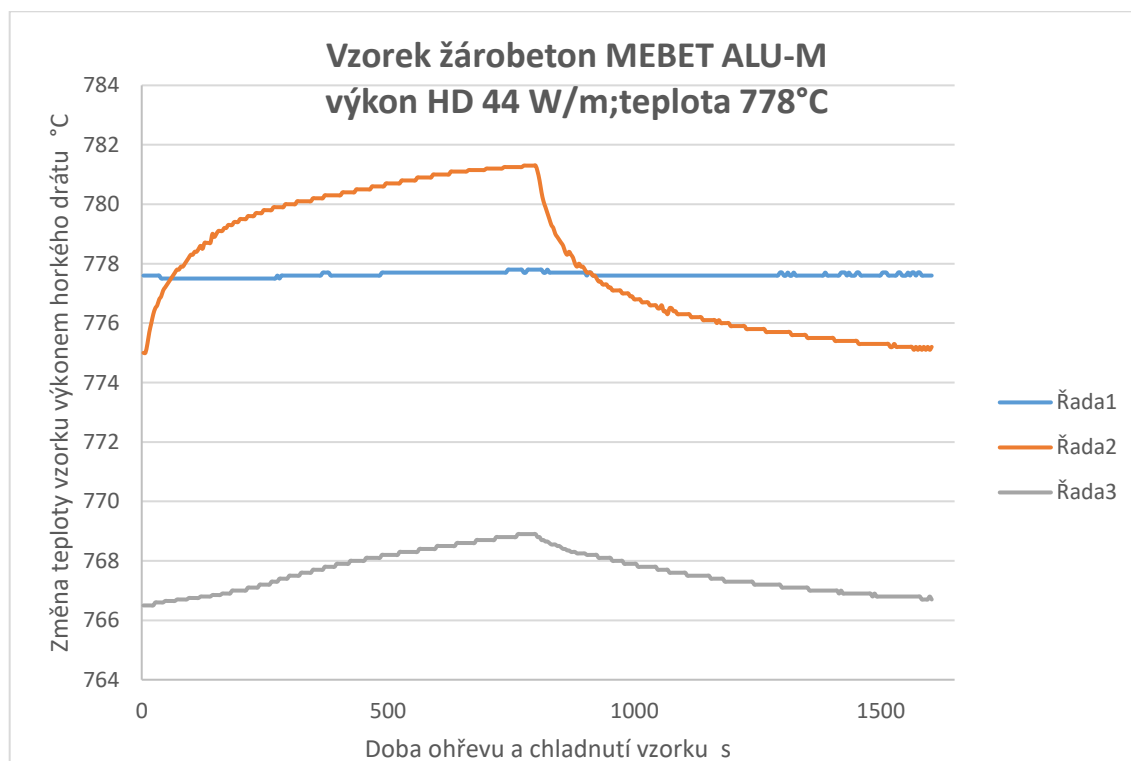
Obrázek 37 Graf průběhu zjištěných teplot při měření na teplotě
198 °C



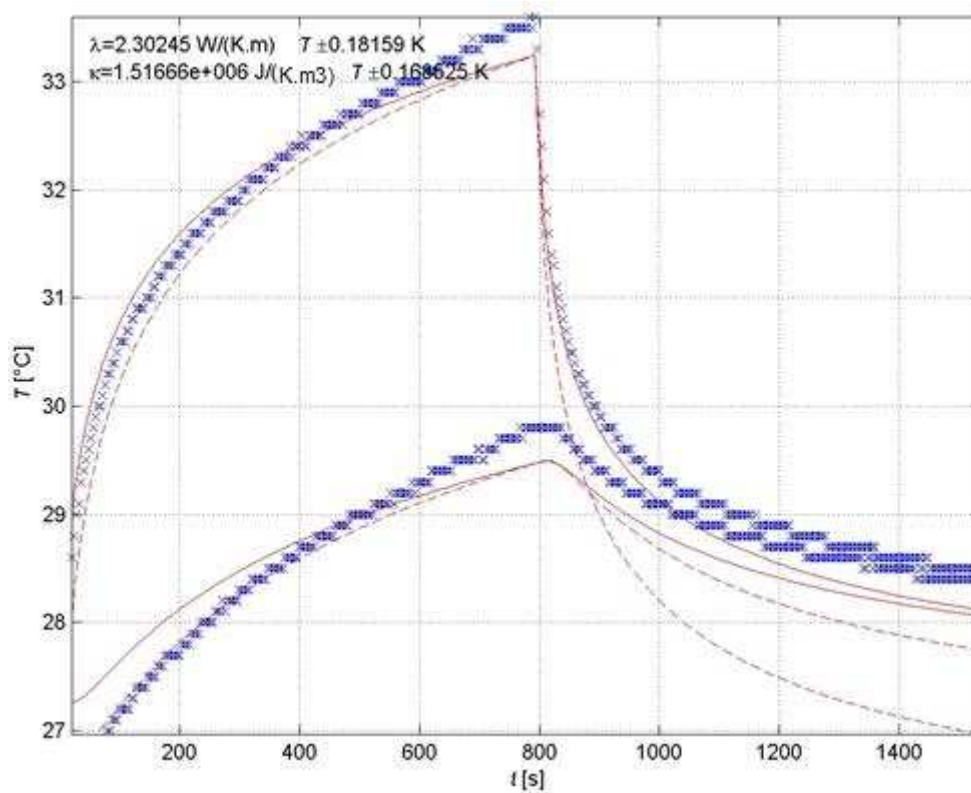
Obrázek 38 Graf průběhu zjištěných teplot při měření na teplotě
380 °C



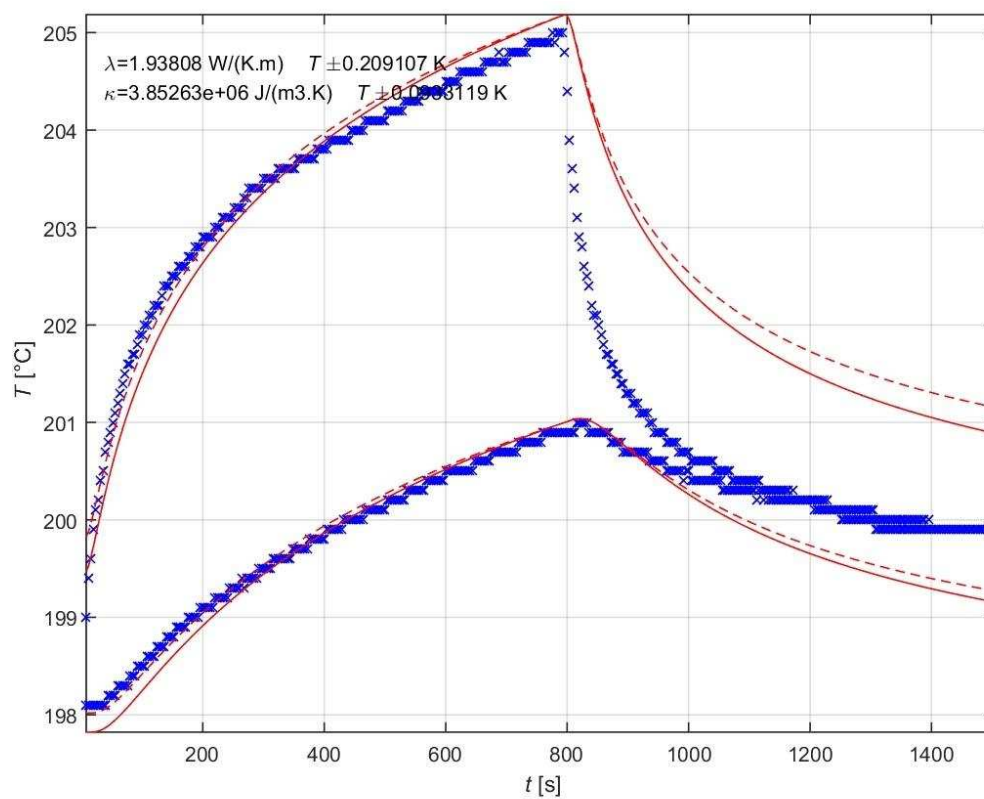
**Obrázek 39 Graf průběhu zjištěných teplot při měření na teplotě
575 °C**



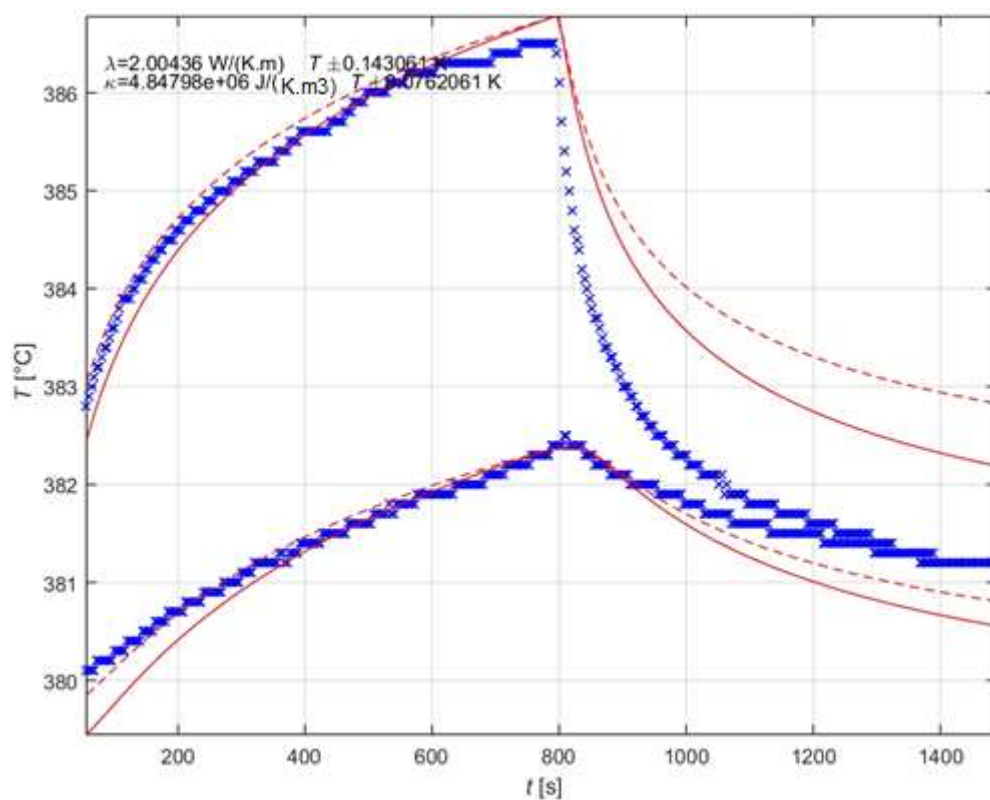
**Obrázek 40 Graf průběhu zjištěných teplot při měření na teplotě
778 °C**



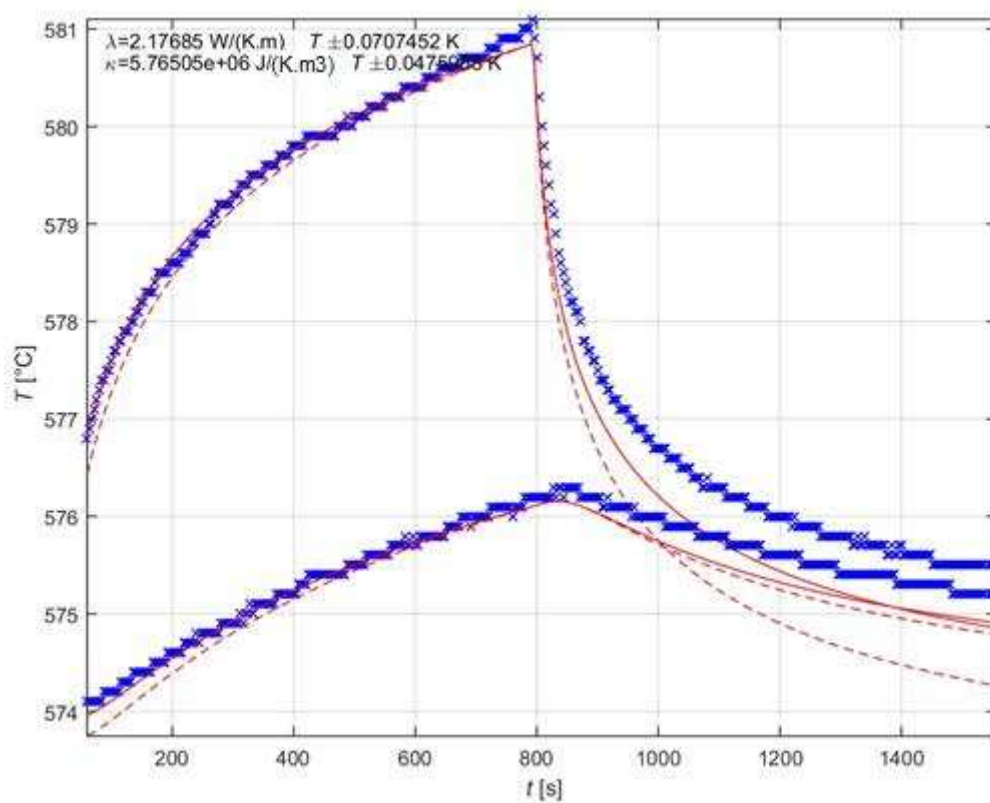
Obrázek 41 Graf vyhodnocení průběhu teplot (26 °C)



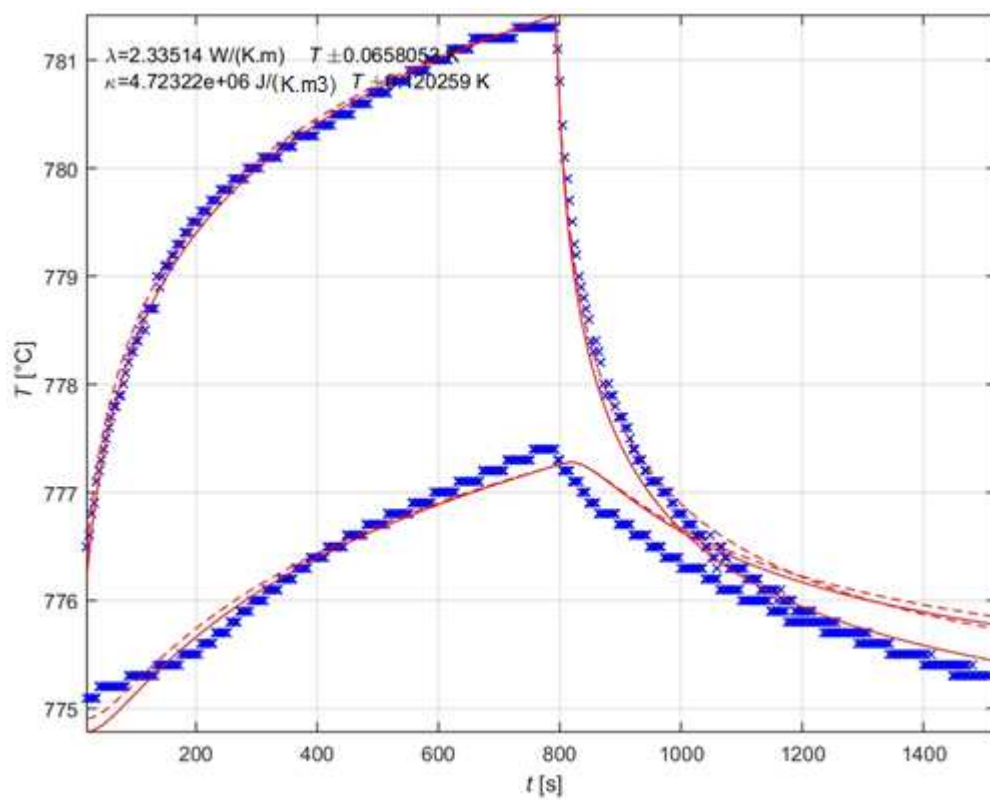
Obrázek 42 Graf vyhodnocení průběhu teplot (198 °C)



Obrázek 43 Graf vyhodnocení průběhu teplot (380 °C)

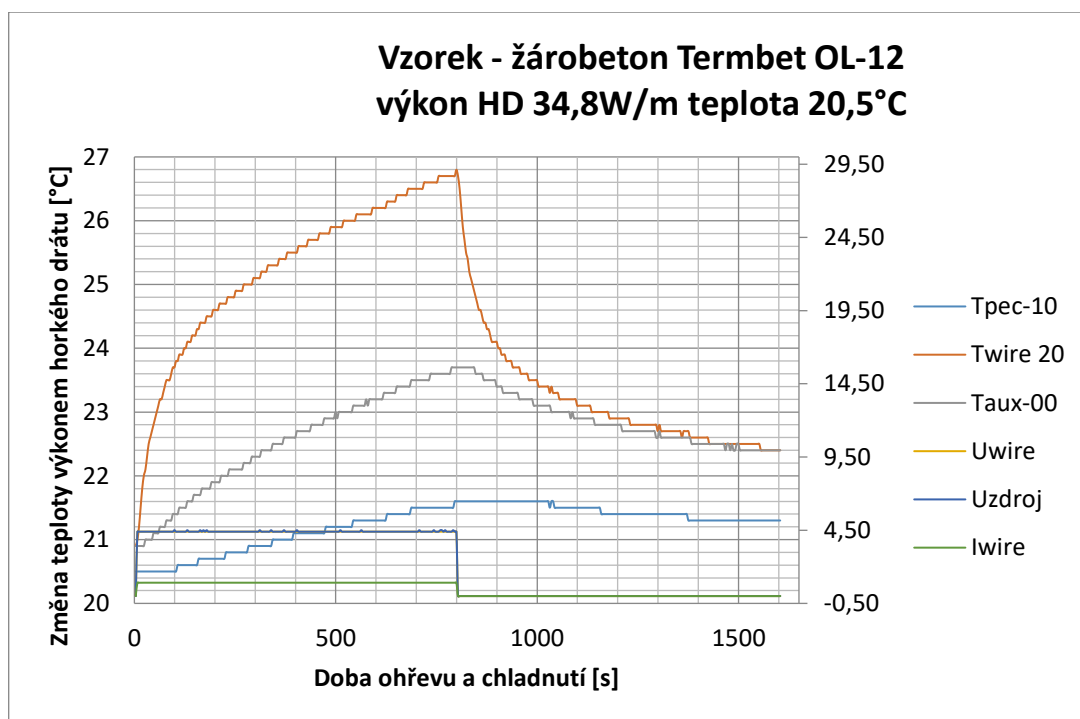


Obrázek 44 Graf vyhodnocení průběhu teplot (575 °C)

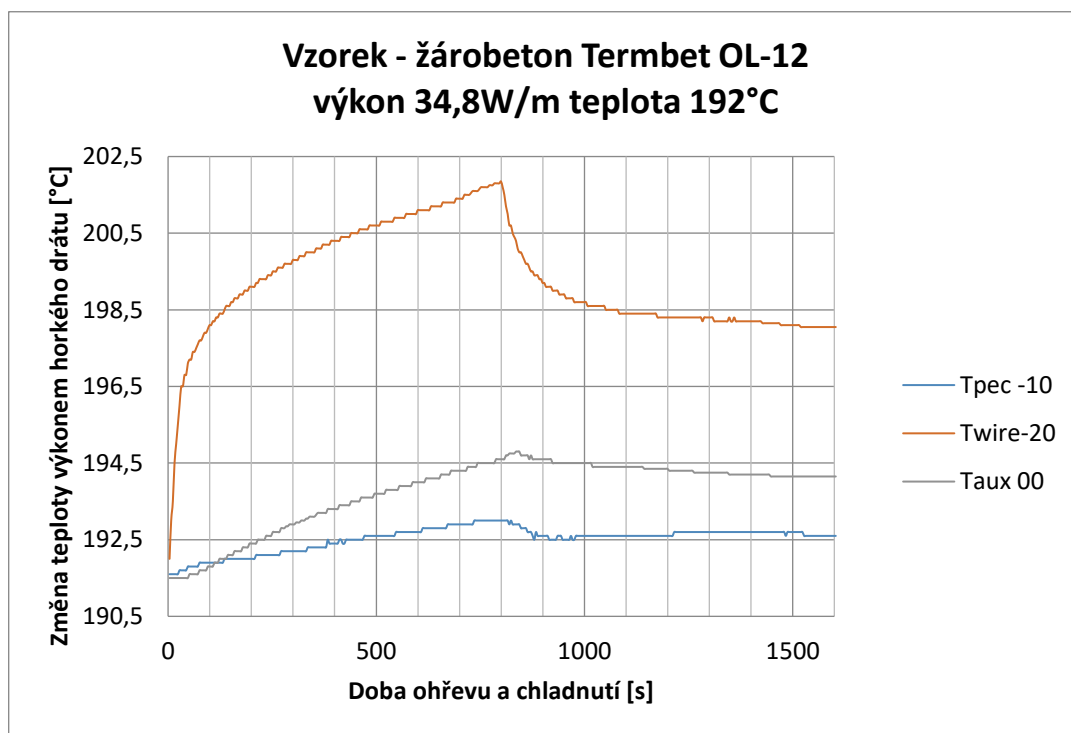


Obrázek 45 Graf vyhodnocení průběhu teplot (778 °C)

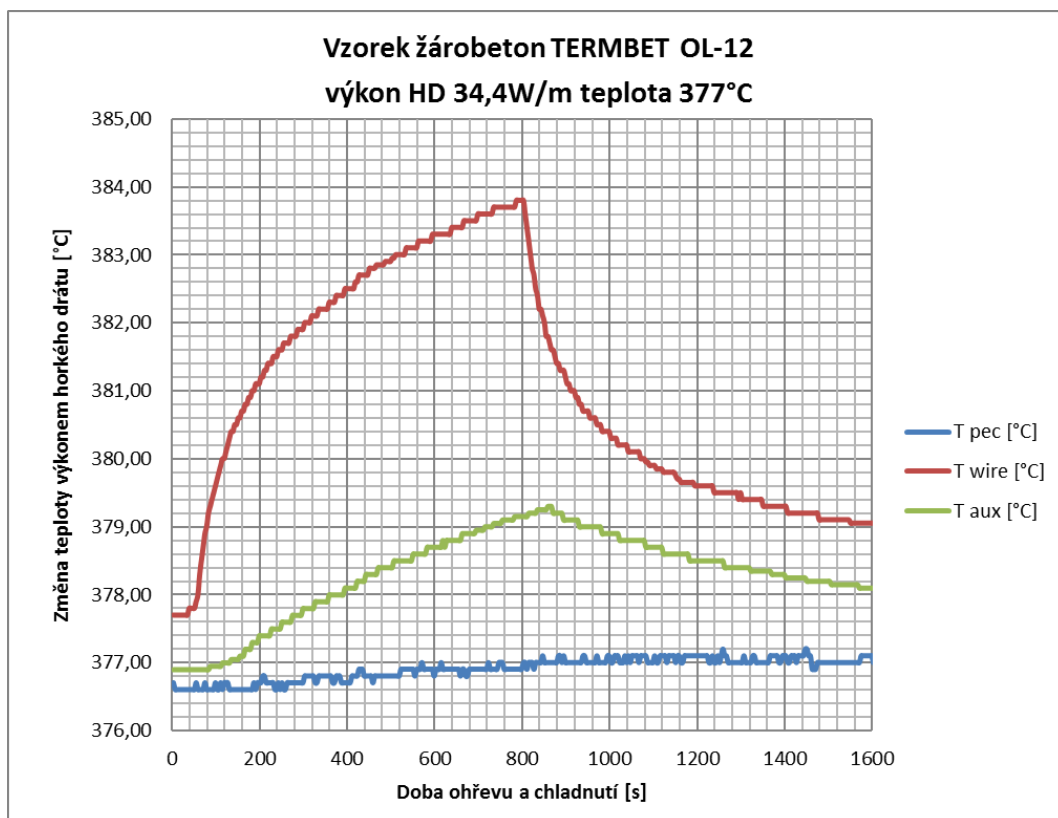
9.2 VZOREK – ŽÁROBETON TERMBET OL-12



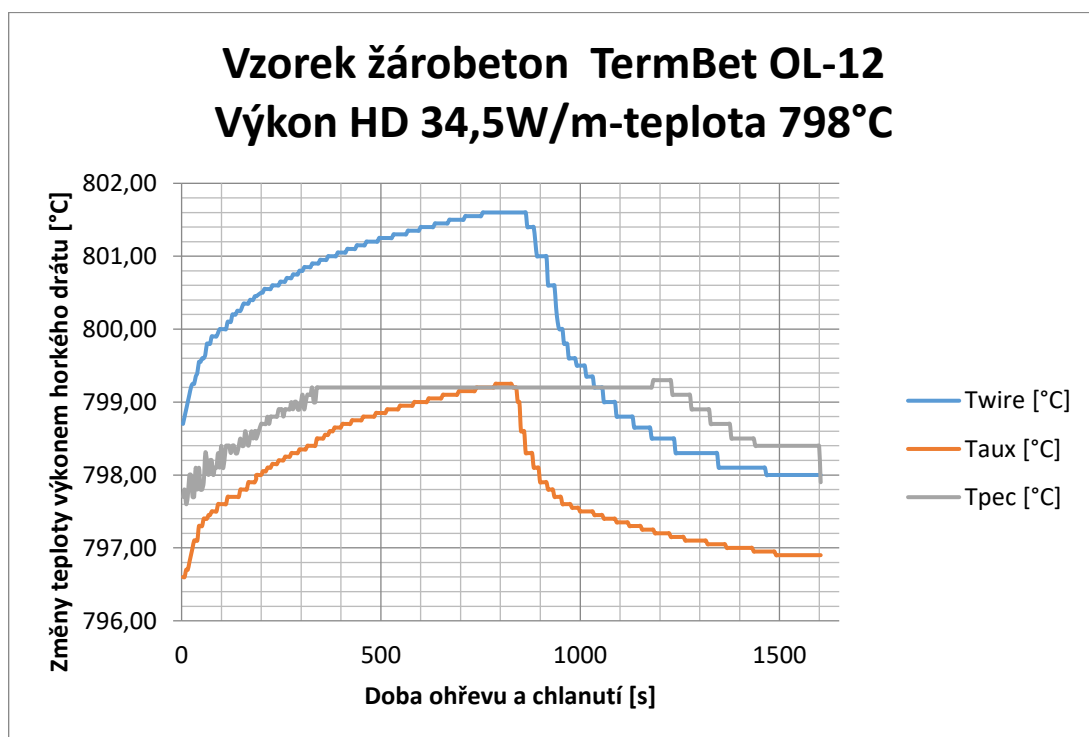
Obrázek 46 Graf průběhu zjištěných teplot při měření na teplotě 20,5 °C



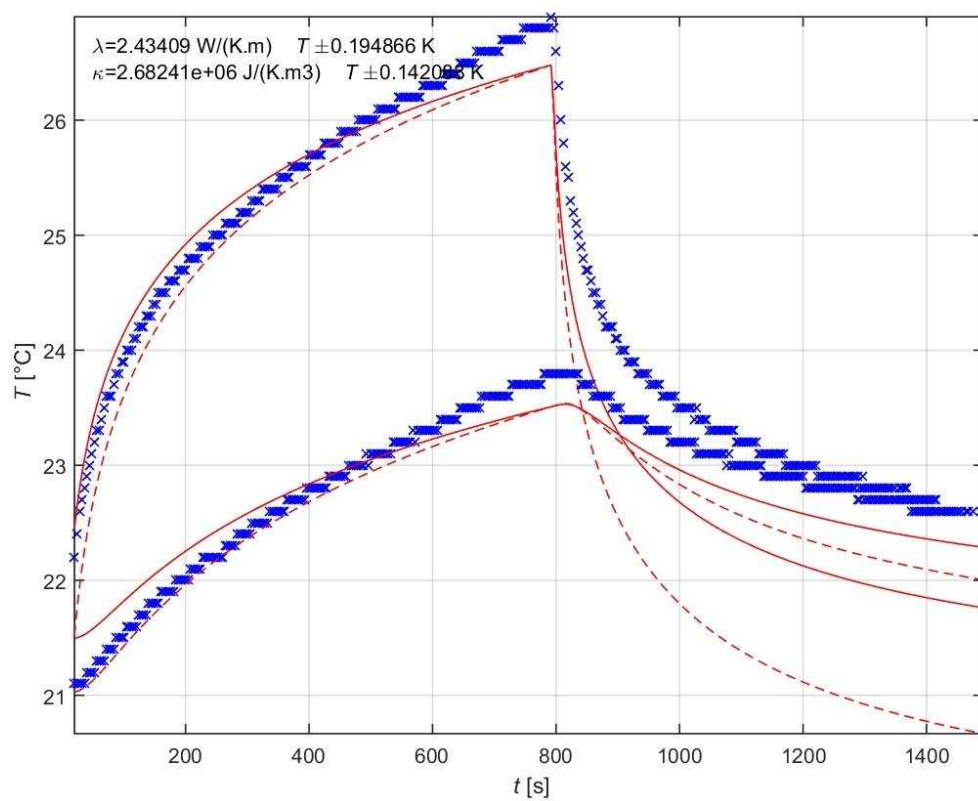
Obrázek 47 Graf průběhu zjištěných teplot při měření na teplotě 192 °C



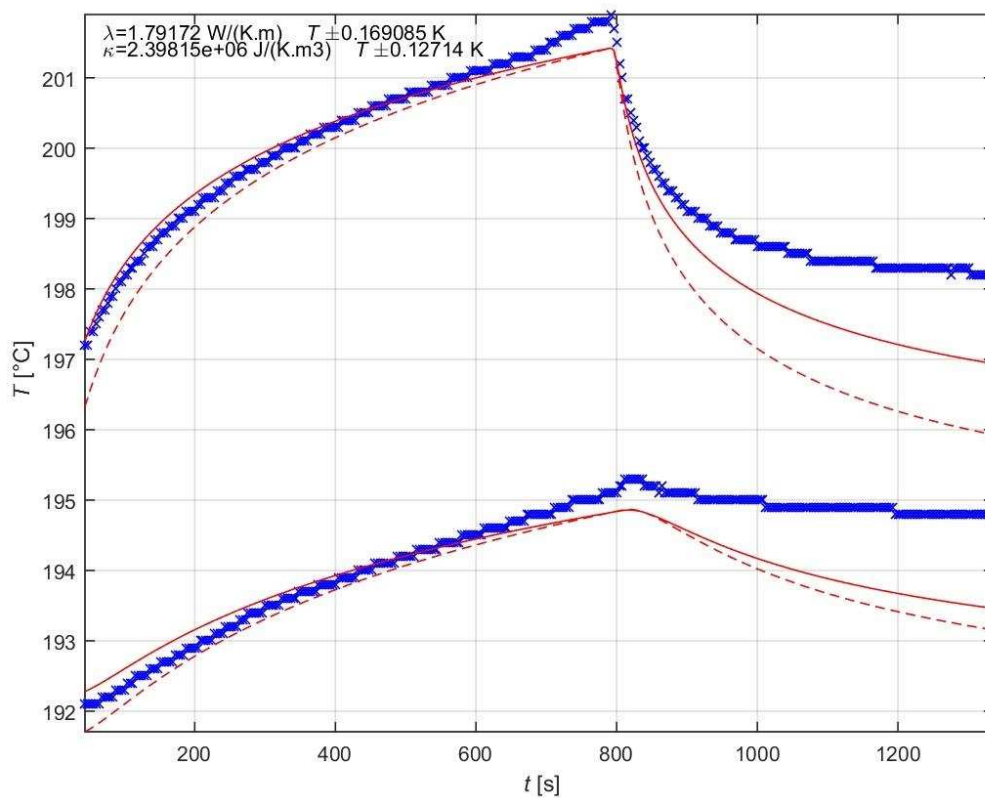
Obrázek 48 Graf průběhu zjištěných teplot při měření na teplotě
377 °C



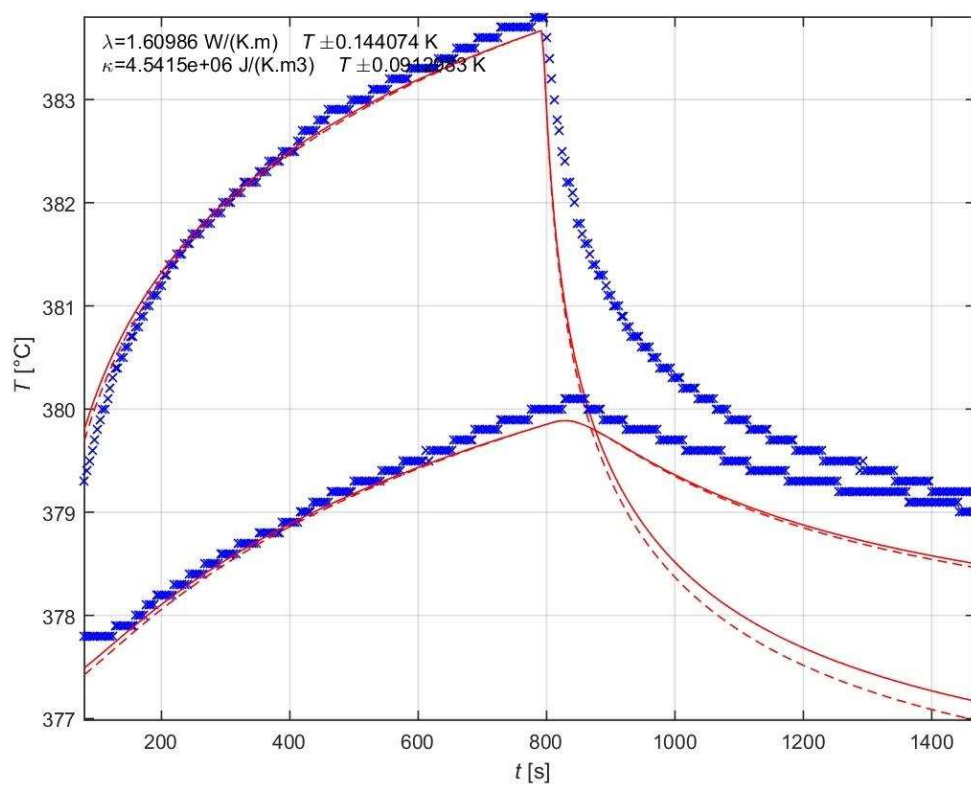
Obrázek 49 Graf průběhu zjištěných teplot při měření na teplotě
798 °C



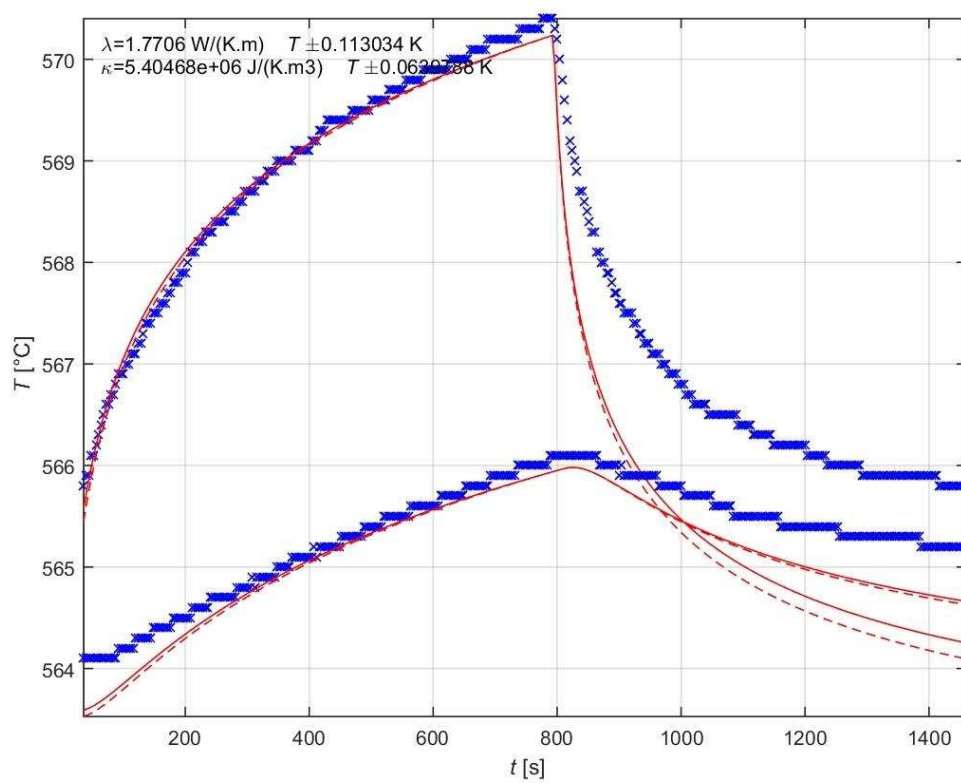
Obrázek 50 Graf vyhodnocení průběhu teplot (20,5 °C)



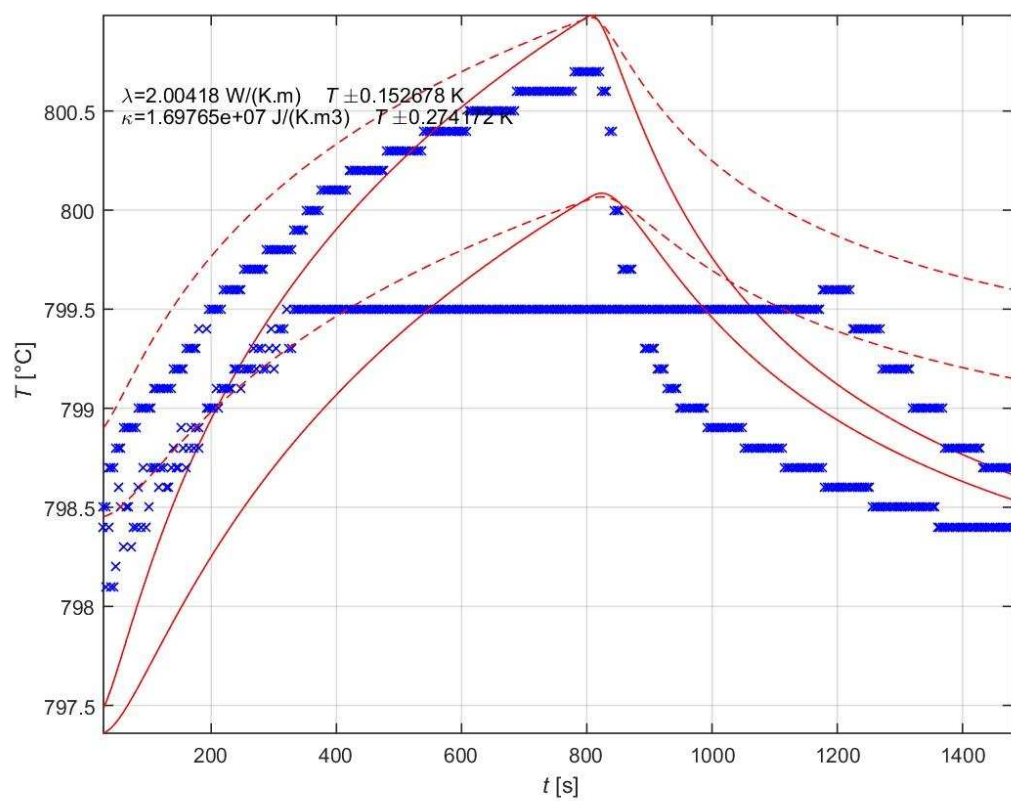
Obrázek 51 Graf vyhodnocení průběhu teplot (192 °C)



Obrázek 52 Graf vyhodnocení průběhu teplot (377 °C)

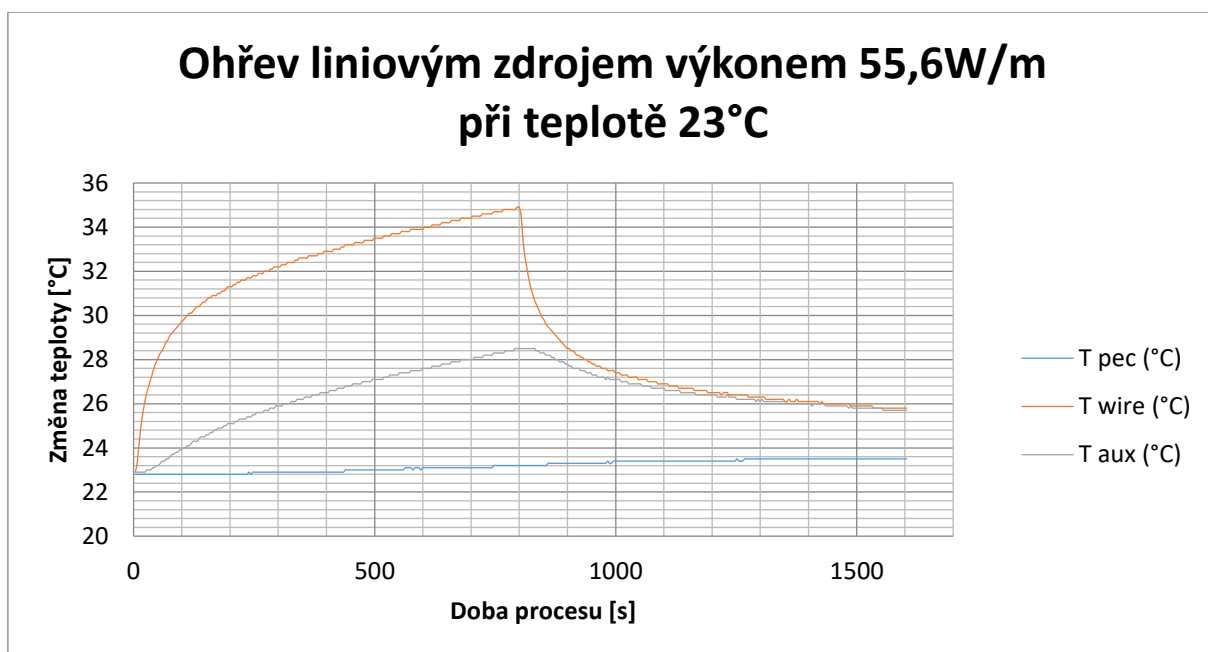


Obrázek 53 Graf vyhodnocení průběhu teplot (600 °C)

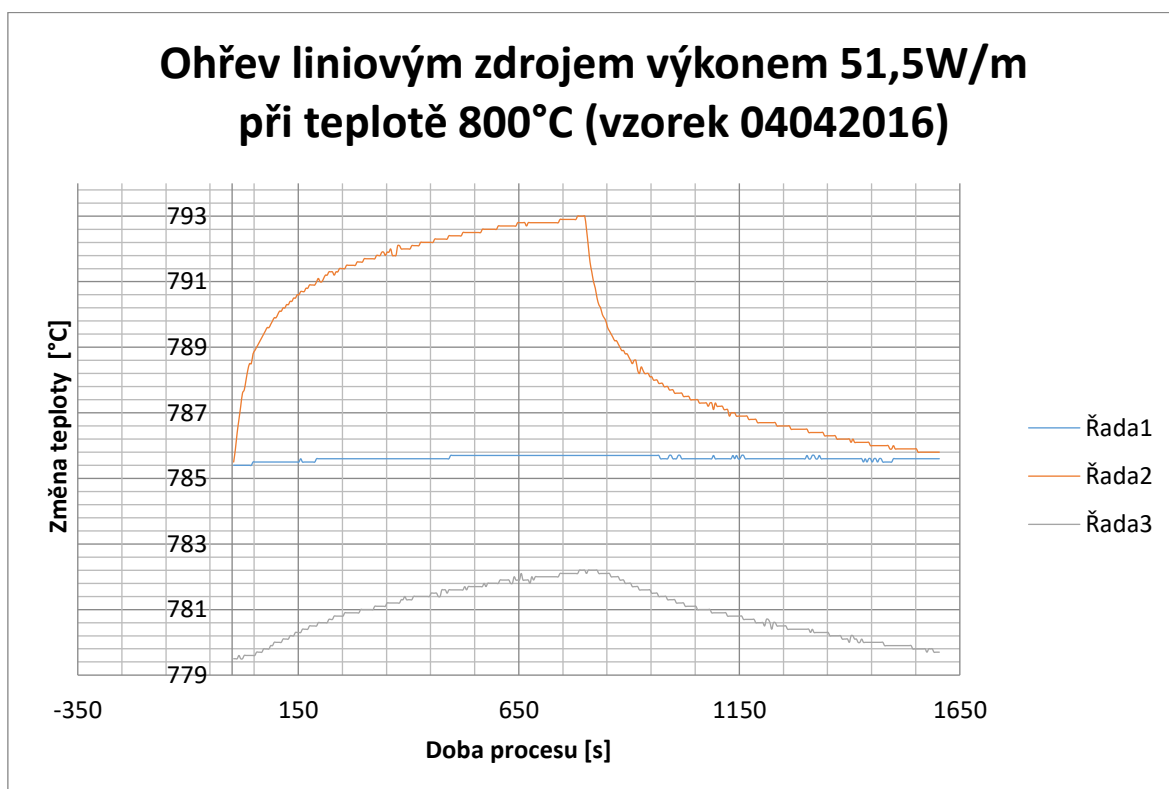


Obrázek 54 Graf vyhodnocení průběhu teplot (798 °C)

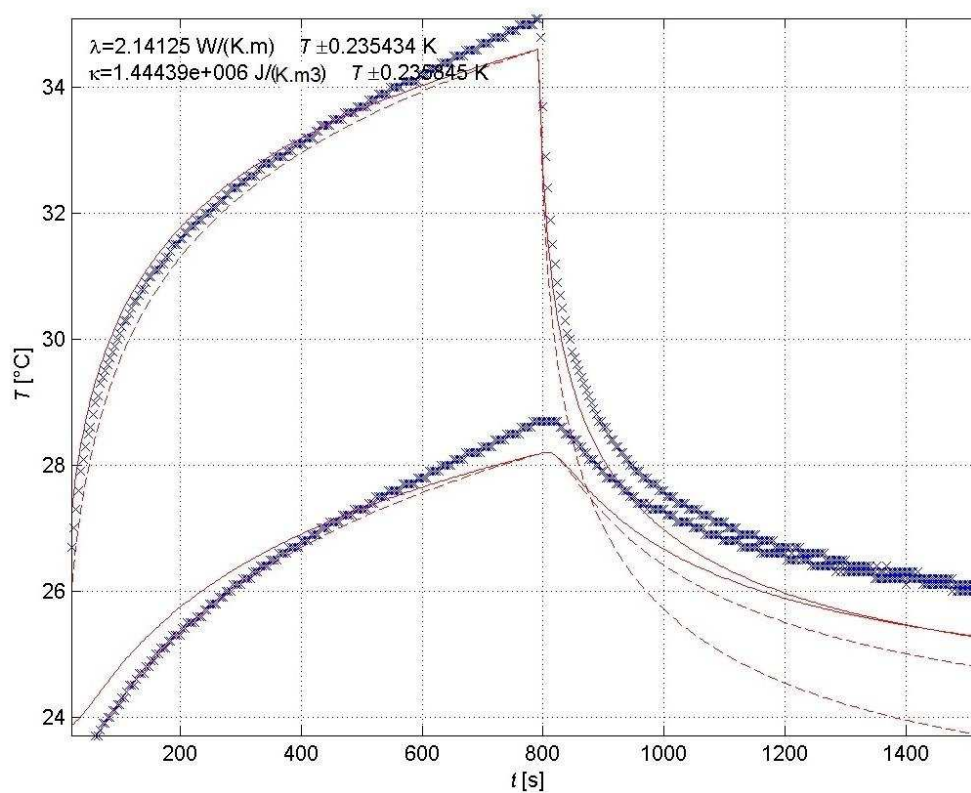
9.3 VZOREK – SLIQ



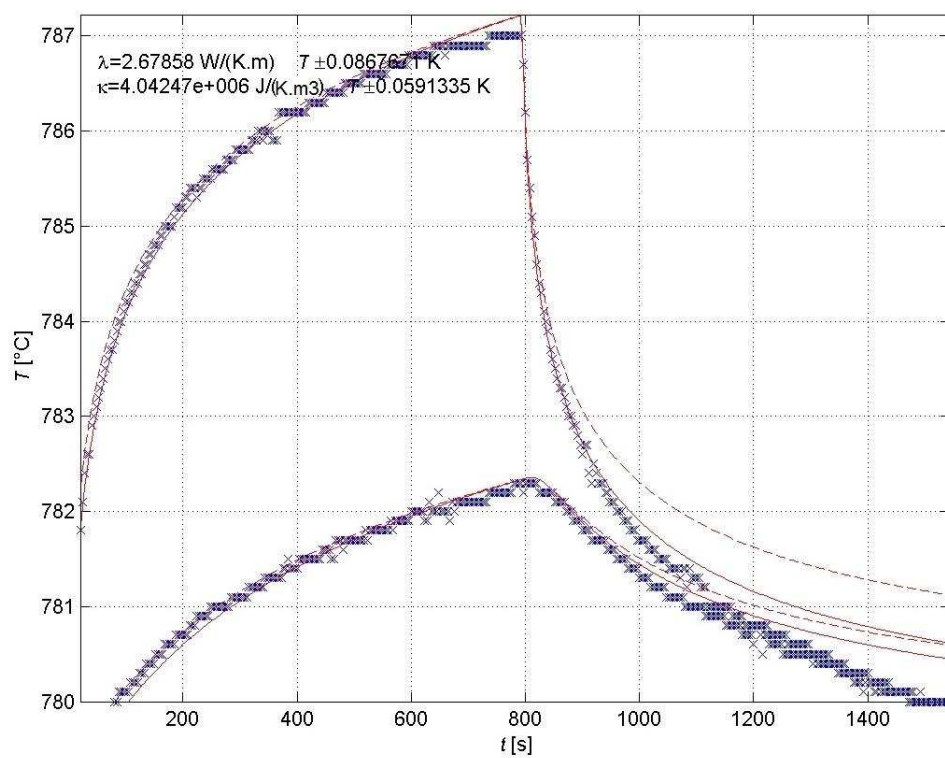
Obrázek 55 Graf průběhu zjištěných teplot při měření na teplotě 23 °C



Obrázek 56 Graf průběhu zjištěných teplot při měření na teplotě
800 °C

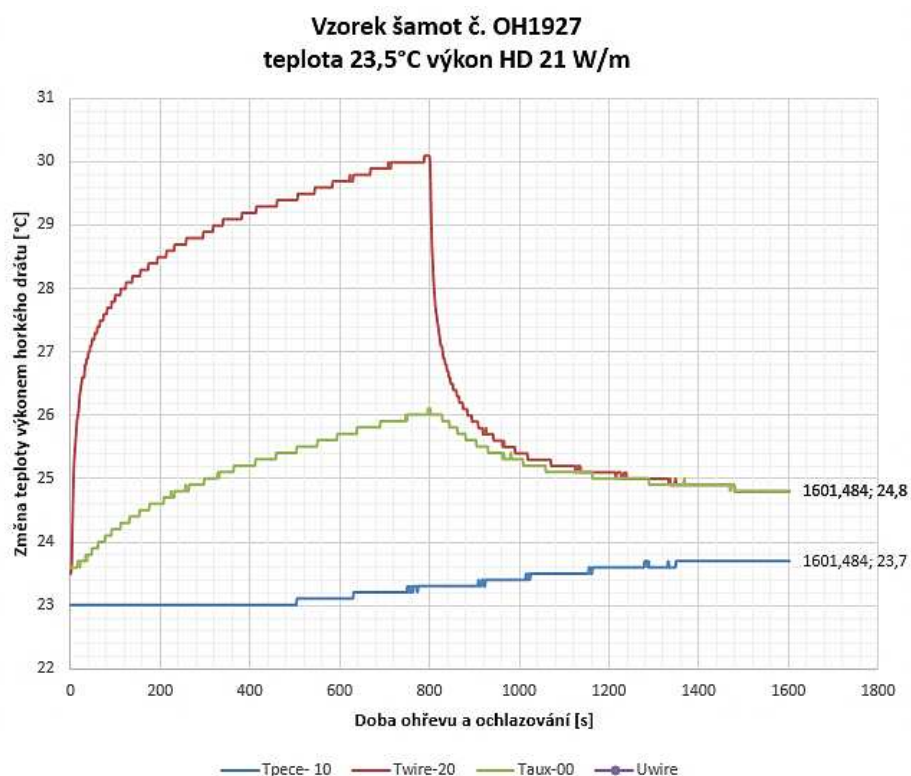


Obrázek 57 Graf vyhodnocení průběhu teplot (23 °C)

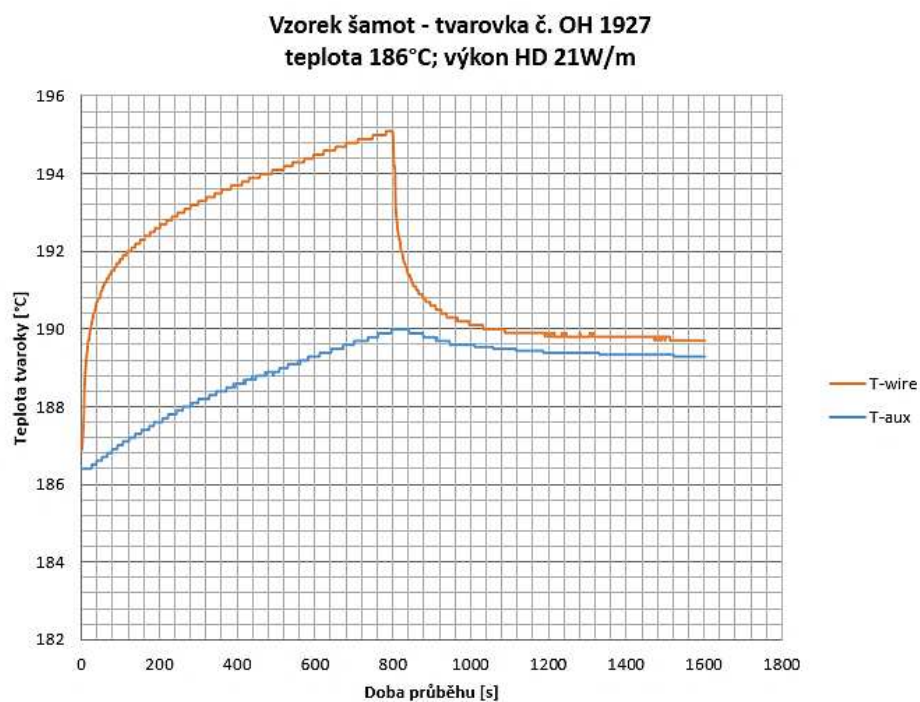


Obrázek 58 Graf vyhodnocení průběhu teplot (800 °C)

9.4 VZOREK – ŠAMOT Č. OH1927

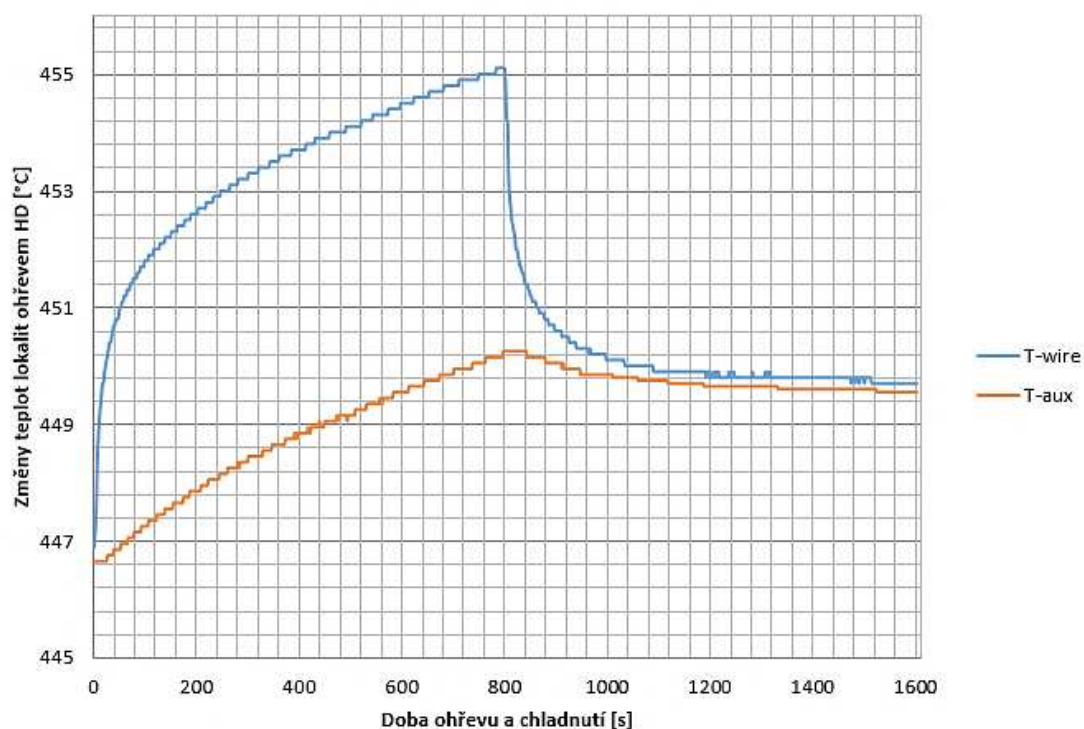


Obrázek 59 Graf průběhu zjištěných teplot při měření na teplotě 23,5 °C



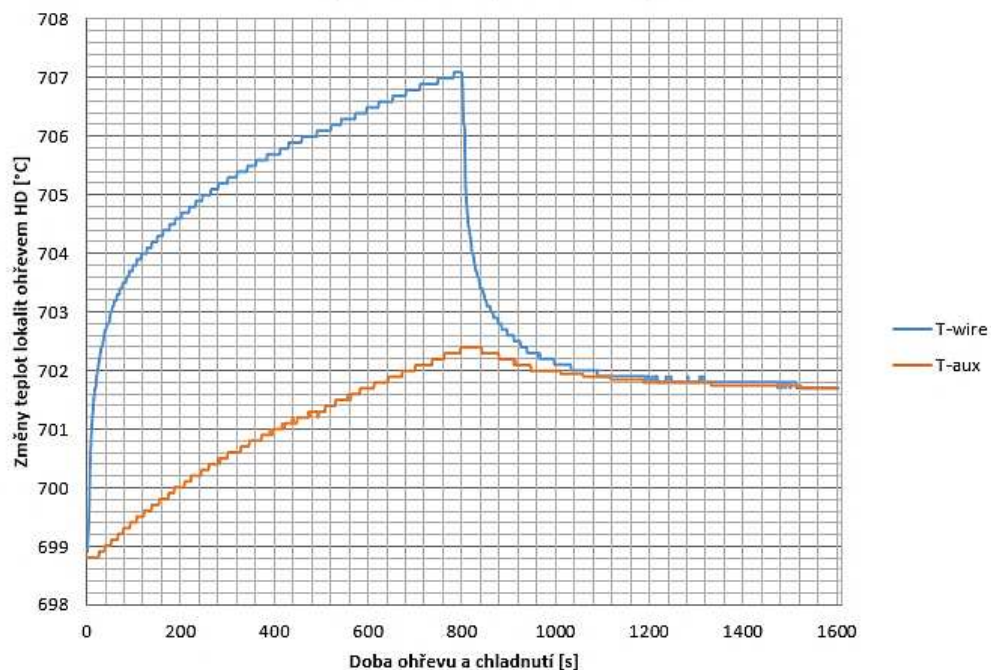
Obrázek 60 Graf průběhu zjištěných teplot při měření na teplotě 186 °C

Vzorek šamot - tvarovka č. OH 1927
teplota 450°C; výkon HD 21W/m

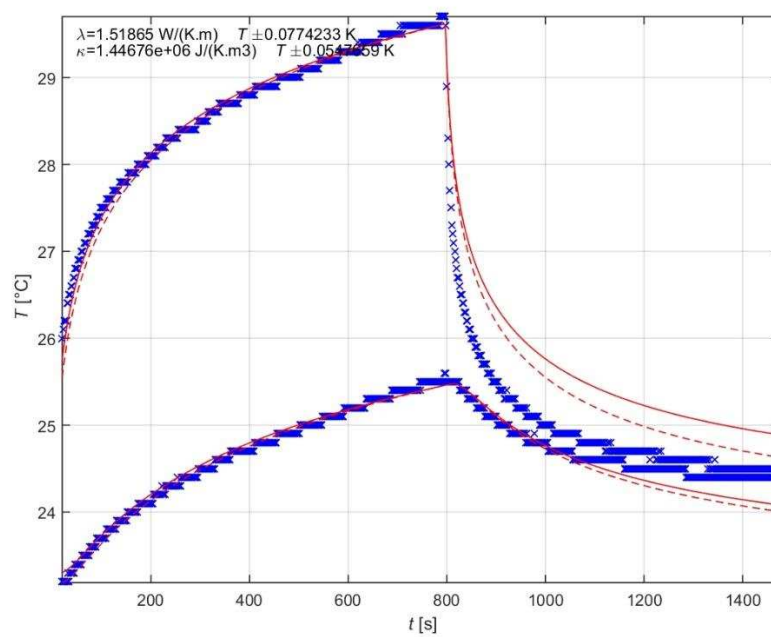


Obrázek 61 Graf průběhu zjištěných teplot při měření na teplotě
 450 °C

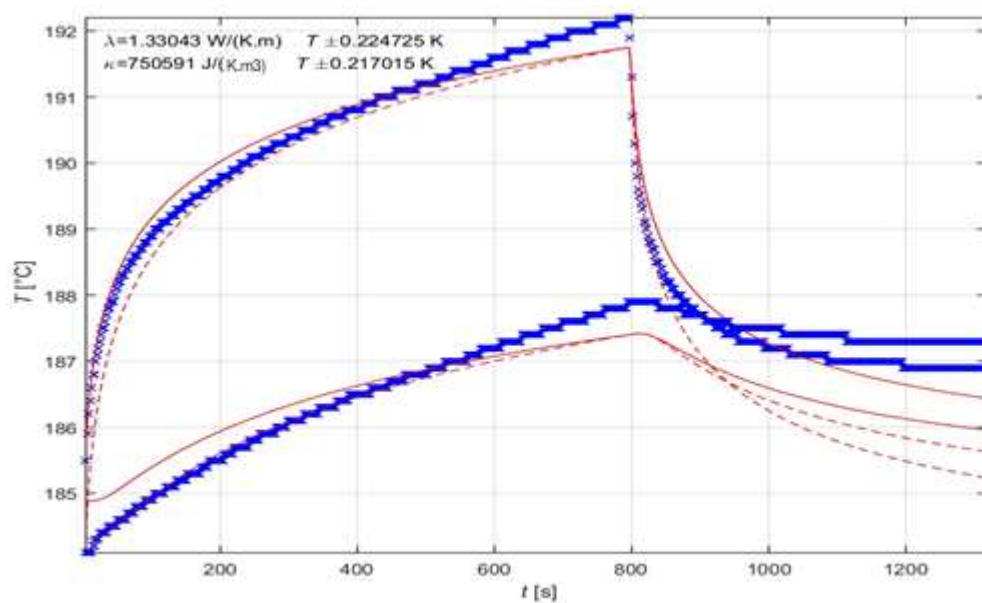
Vzorek šamot - tvarovka č. OH 1927
teplota 700°C; výkon HD 21W/m



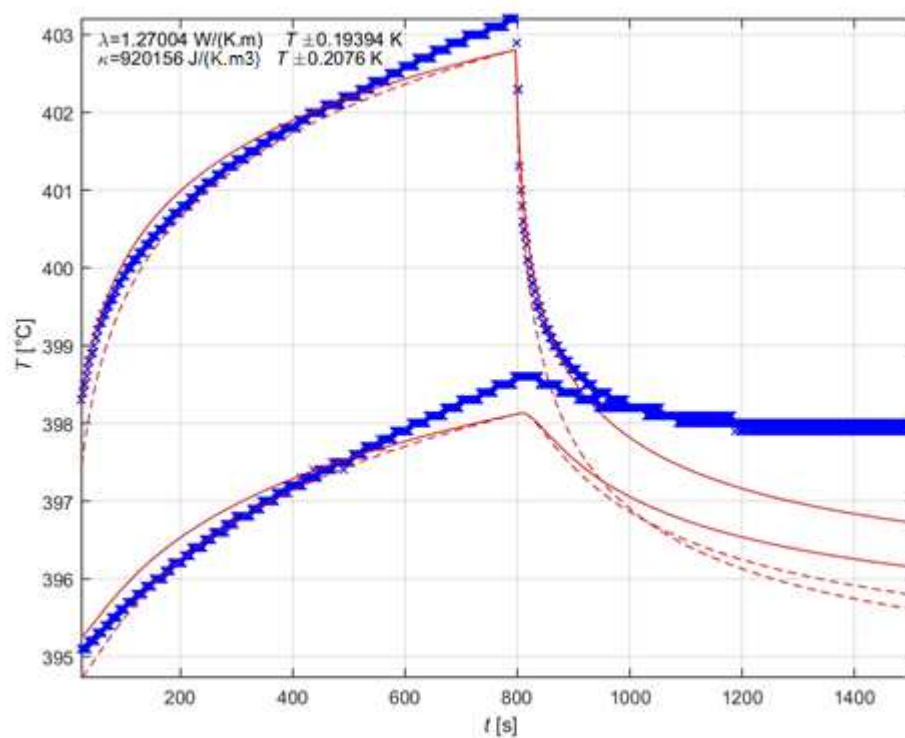
Obrázek 62 Graf průběhu zjištěných teplot při měření na teplotě
 700 °C



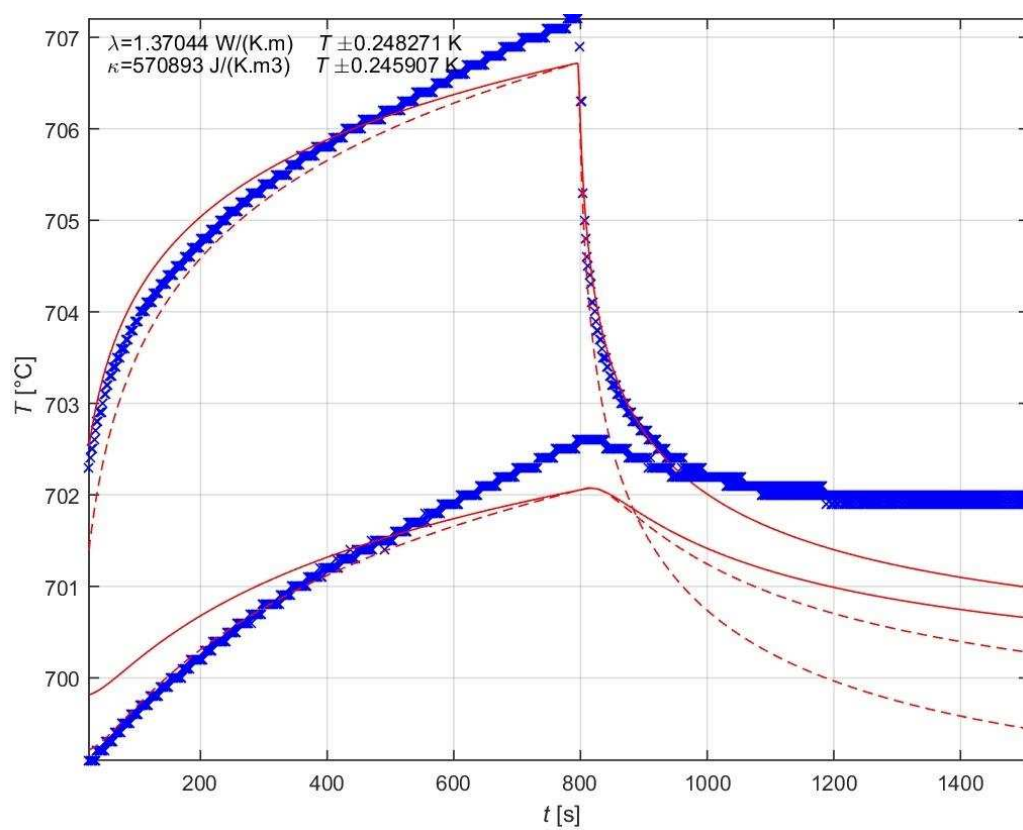
Obrázek 63 Graf vyhodnocení průběhu teplot (23,5 °C)



Obrázek 64 Graf vyhodnocení průběhu teplot (186 °C)

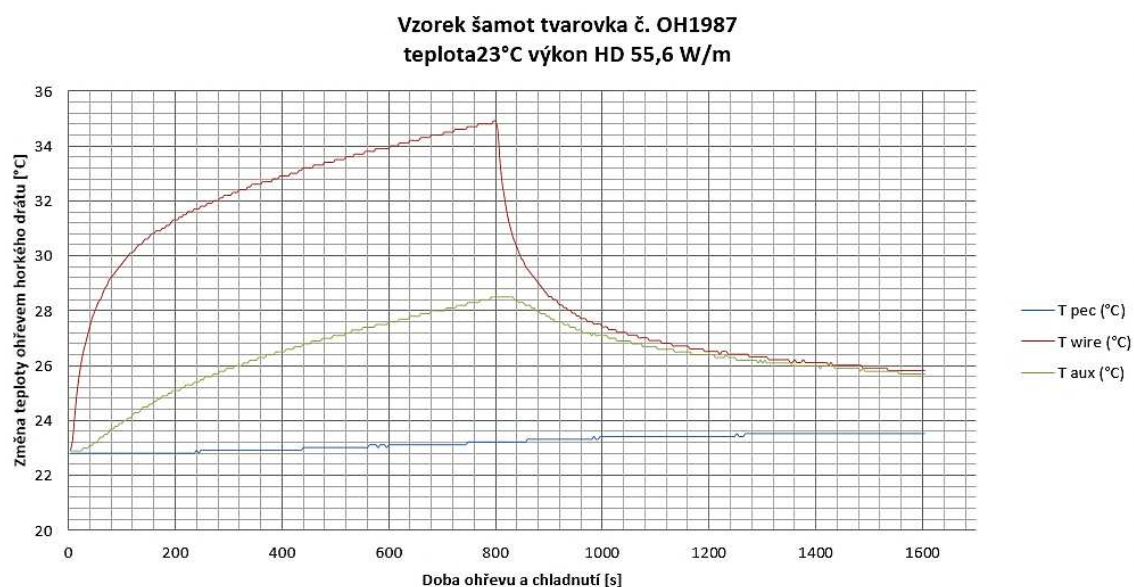


Obrázek 65 Graf vyhodnocení průběhu teplot (450 °C)

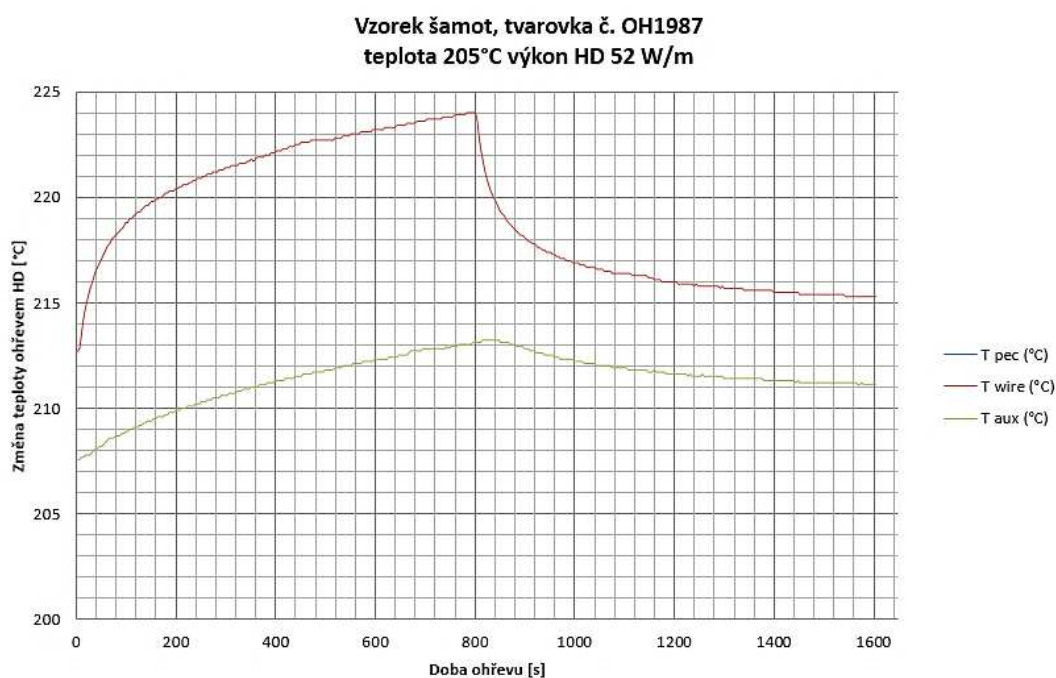


Obrázek 66 Graf vyhodnocení průběhu teplot (700 °C)

9.5 VZOREK – ŠAMOT Č. OH1987

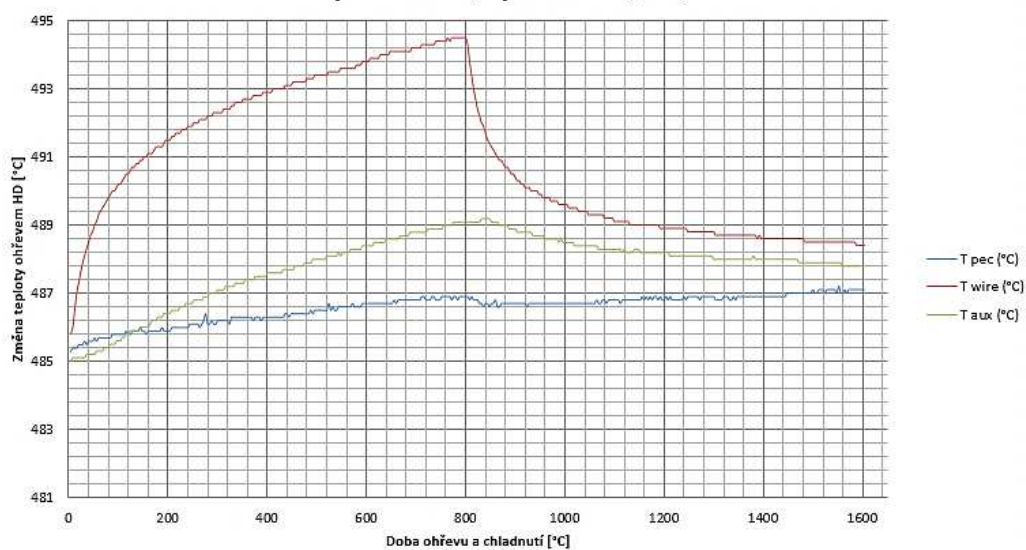


Obrázek 67 Graf průběhu zjištěných teplot při měření na teplotě 23 °C



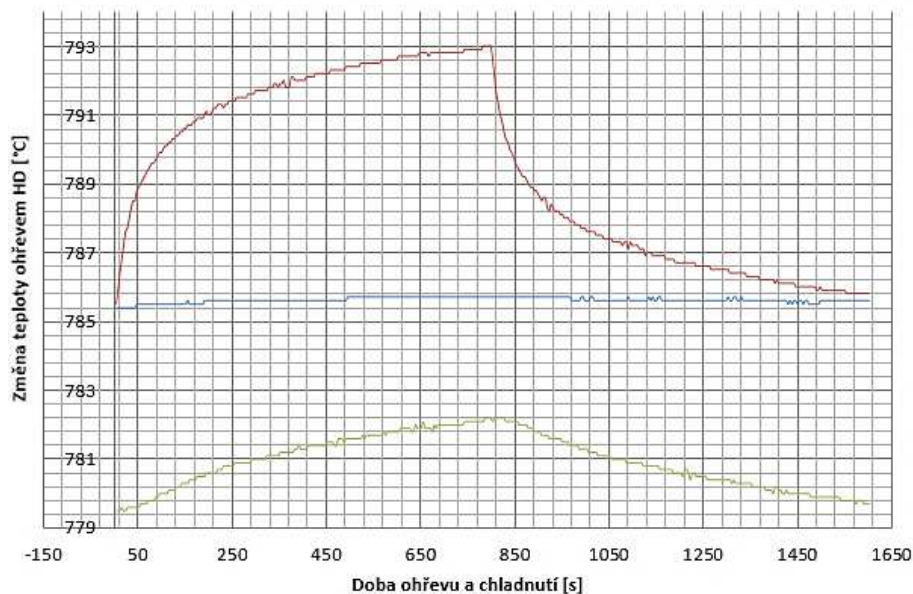
Obrázek 68 Graf průběhu zjištěných teplot při měření na teplotě 205 °C

Vzorek šamot, tvarovka č OH1987
teplota 480 °C, výkon HD 49,5 W/m

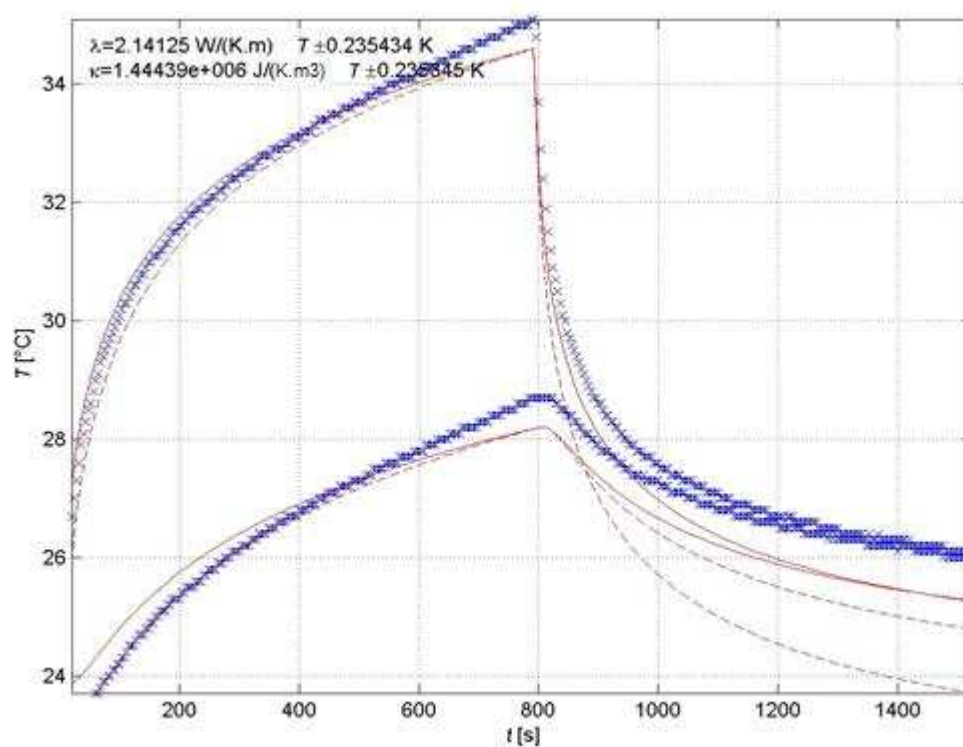


Obrázek 69 Graf průběhu zjištěných teplot při měření na teplotě
480 °C

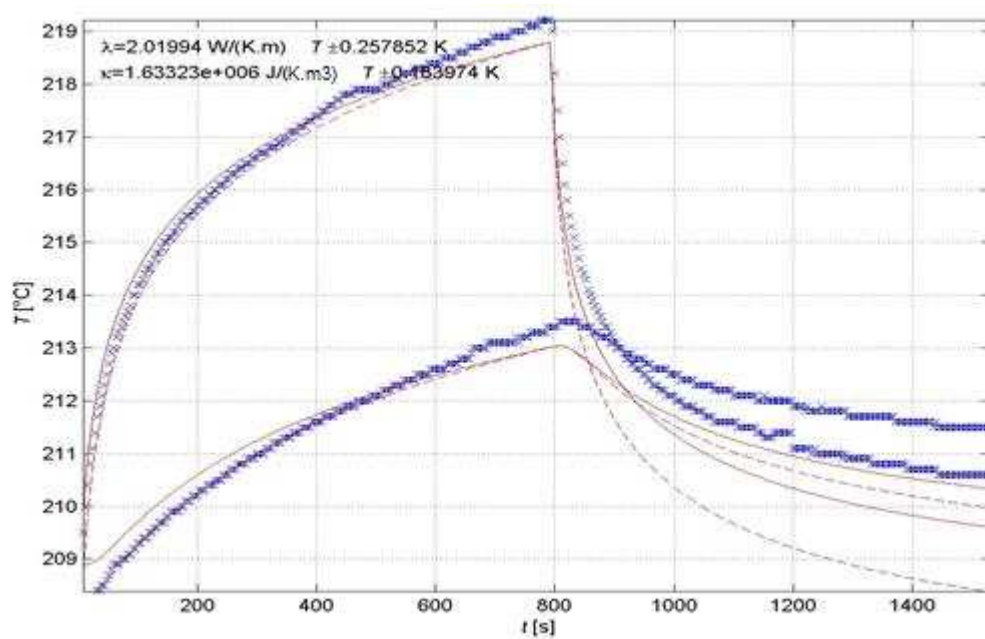
Vzorek šamot, tvarovka č. OH1987
teplota 785°C výkon HD 51,4 W/m



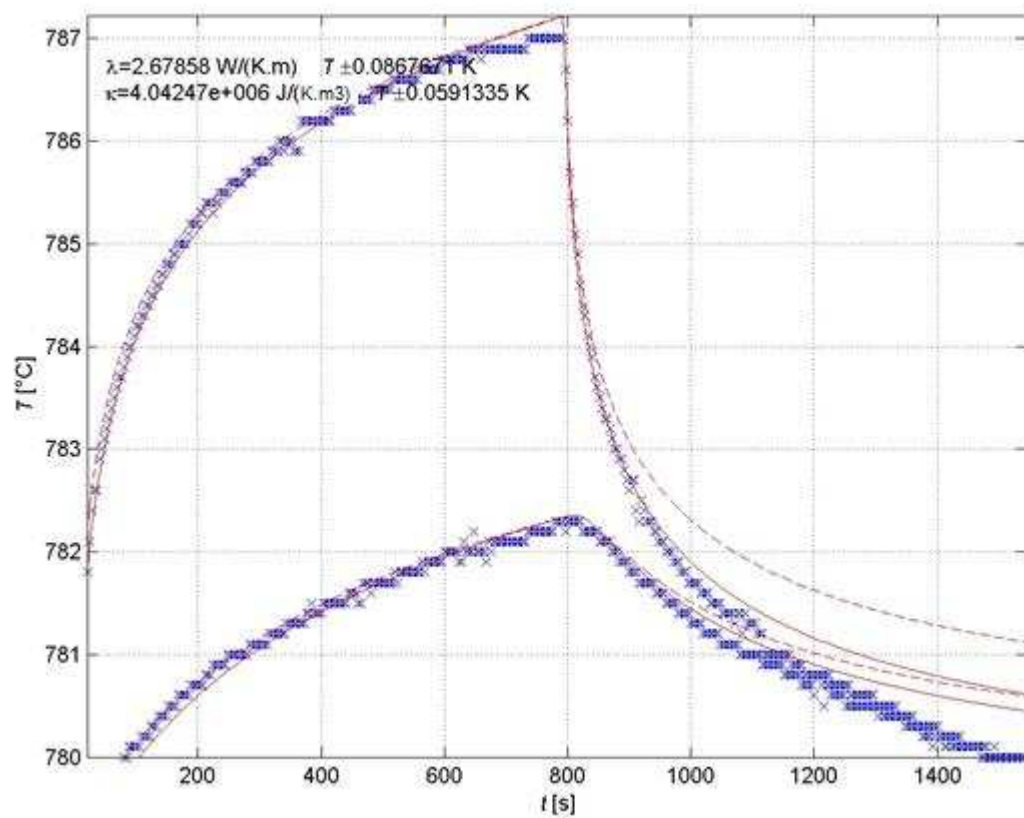
Obrázek 70 Graf průběhu zjištěných teplot při měření na teplotě
785 °C



Obrázek 71 Graf vyhodnocení průběhu teplot (23 °C)



Obrázek 72 Graf vyhodnocení průběhu teplot (205 °C)



Obrázek 73 Graf vyhodnocení průběhu teplot (785 °C)

9.6 MATERIÁLOVÁ CHARAKTERISTIKA MĚŘENÝCH VZORKŮ

Tab. 5 Chemické složení vzorku MEBET ACU-M

MEBET ACU-M			
Typ:		hutný žárobeton	
Objemová hmotnost:		3300 kg/m³	
Chemické složení			
Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO

Tab. 6 Chemické složení vzorku TermBet OL-12 (20)

TermBet OL-12 (20)				
Typ:		hutný beton do prostředí se zvýšenou teplotou		
Objemová hmotnost:		2650 kg/m³		
Chemické složení				
Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	CaO	MgO
7%	40%	Fe ₂ O ₃	5,5%	35%

Tab. 7 Chemické složení vzorku SLIQ

SLIQ				
Typ:		pálené magnezitové stavivo		
Objemová hmotnost:		3000 kg/m ³		
Chemické složení				
MgO	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
7%	40%	8,5%	5,5%	35%

Tab. 8 Chemické složení vzorku ŠAMOT OH1927

ŠAMOT OH1927			
Typ:		šamot	
Objemová hmotnost:		1900 kg/m³	
Chemické složení			
SiO₂	CaO	Fe₂O₃	Al₂O₃
60	0,25	2	36

Tab. 9 Chemické složení vzorku ŠAMOT OH1987

ŠAMOT OH1987			
Typ:		šamot	
Objemová hmotnost:		1970	
Chemické složení			
SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
55	0,4	2,5	42

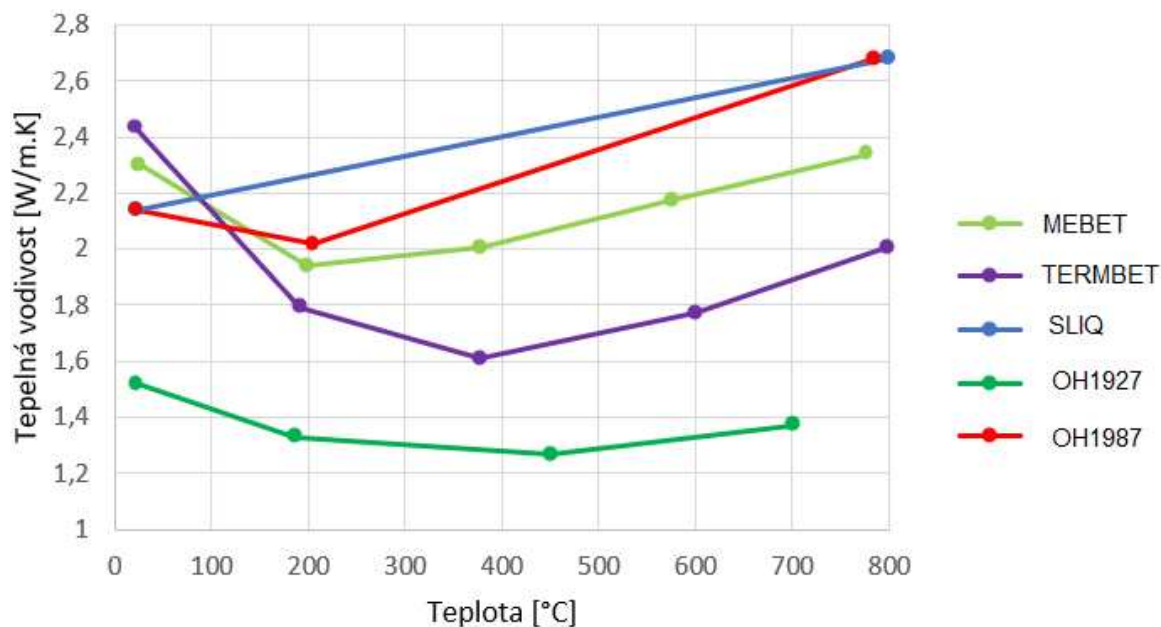
Tab. 10 Tepelná kapacita měřených materiálů při definované teplotě

MEBET ACU-M	Teplota [°C]	26	198	380	575	778
	Tepelná kapacita [J/kg.K]	459,6	1167,5	1469,1	1747,0	1431,3
TERMBET OL-12	Teplota [°C]	20,5	192	377	600	798
	Tepelná kapacita [J/kg.K]	1012,2	905,0	1713,8	2039,5	640,6
SLIQ	Teplota [°C]	23	800	-	-	-
	Tepelná kapacita [J/kg.K]	481,5	1347,5	-	-	-
ŠAMOT OH1927	Teplota [°C]	23,5	186	450	700	-
	Tepelná kapacita [J/kg.K]	761,5	395,1	484,3	300,5	-
ŠAMOT OH1987	Teplota [°C]	23	205	785	-	-
	Tepelná kapacita [J/kg.K]	733,2	859,6	2052,0	-	-

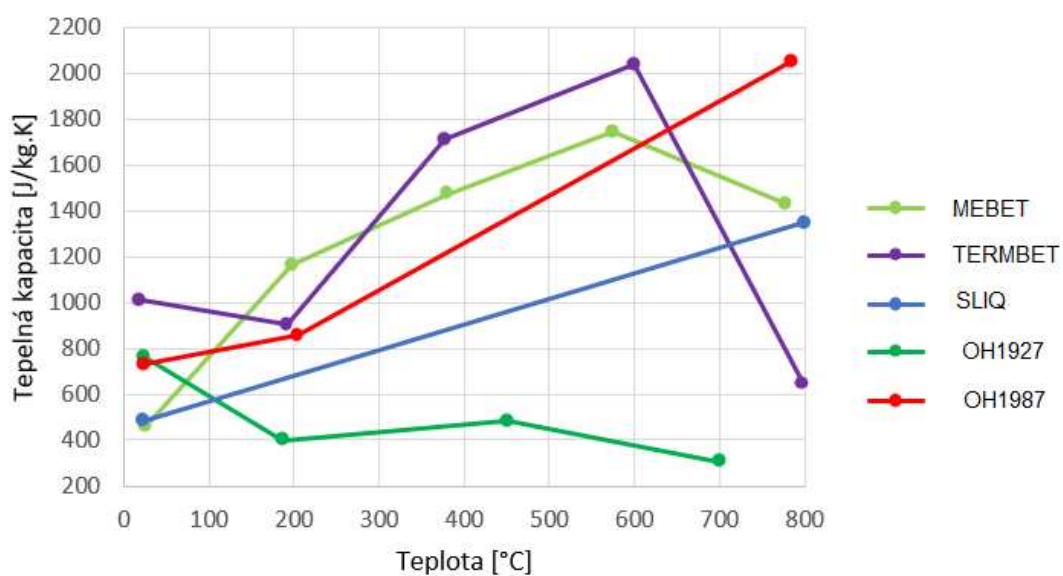
Tab. 11 *Tepelná vodivost měřených materiálů při definovaných teplotách*

MEBET ACU-M	Teplota [°C]	26	198	380	575	778
	Tepelná vodivost [W/m.K]	2,302	1,938	2,004	2,177	2,335
TERMBET OL-12	Teplota [°C]	20,5	192	377	600	798
	Tepelná vodivost [W/m.K]	2,434	1,792	1,610	1,771	2,004
SLIQ	Teplota [°C]	23	800	-	-	-
	Tepelná vodivost [W/m.K]	2,141	2,679	-	-	-
ŠAMOT OH1927	Teplota [°C]	23,5	186	450	700	-
	Tepelná vodivost [W/m.K]	1,519	1,330	1,270	1,37	-
ŠAMOT OH1987	Teplota [°C]	23	205	785	-	-
	Tepelná vodivost [W/m.K]	2,141	2,020	2,679	-	-

Dále je na grafech znázorněna závislost tepelné vodivosti na teplotě a tepelné kapacity na teplotě.



Obrázek 74 Závislost tepelné vodivosti na teplotě sledovaných vzorků



Obrázek 75 Závislost tepelné kapacity na teplotě

10 ZÁVĚR

Výhody solární energie jsou lidstvu již dávno známy. Jde především o ochranu životního prostředí a krajiny, ve které žijeme. Mezi další výhody patří skutečnost, že sluneční energie je nevyčerpatelný zdroj energie, neovlivňuje tepelnou rovnováhu Země a také je lidstvu k dispozici zadarmo. Příroda kolem nás je bohatství, které bychom měli chránit, a ne naší činností úmyslně devastovat. Už nyní my sami pociťujeme, že naše okolí nevypadá tak, jako před pár desítky lety. Budeme mít za dalších pár desítek let co předat další generaci? Proto že třeba přírodu chránit a snažit se ji pomoci po zásadu lidstva pomoci.

Vhodným způsobem, jak toho dosáhnout, je využívat energii zásobující stavební objekty, pocházející sluneční energie. Tuto energii je možné využívat jak vytápění a ohřevu teplé vody, tak k výrobě elektrické energie. Stavební objekt by byl zásobován pouze energií pocházející pouze ze slunečního záření bez potřeby energií pocházející z neobnovitelných zdrojů.

Aby tohle všechno bylo možné, musí být v období s vysokou sluneční intenzitou akumulováno a uchováno takové množství tepelné energie, které vystačí na celý rok. A právě k tomu slouží tepelný zásobník, jehož jádro je tvořeno materiálem, které disponuje vysokou tepelnou kapacitou, pro uchování co největšího množství energie a vysokou tepelnou vodivostí, pro umožnění nabíjení a vybíjení zásobníku. Tato práce se zabývala selekcí vhodných materiálů a měření jejich tepelných charakteristik upravenou metodou horkého drátu.

V rámci praktické byly proměřeny vzorky, jejich technické názvy jsou MEBET ACU-M, TermBet OL 12 (20) a SLIQ. Nejvyšší tepelná kapacita byla naměřena u vzorku TermBet OL 12 (20), který tvořil z 40 % SiO_2 , 35 % MgO , 8,5 % Fe_2O_3 , 7 % Al_2O_3 a 5,5 % CaO . U tohoto materiálu byla naměřena tepelná kapacita 2 039,5 J/kg.K.

V další praktické části byla výpočtově stanovena velikost akumulčního jádra vysokokapacitního zásobníku. Výpočet potřeby energie pro zvolený stavební objekt vychází z průměrných klimatických dat naměřených v průběhu předešlých let pro oblast Brna. Akumulační jádro bylo navrženo ve tvaru válce a dosahuje 4 m na výšku a 2 m v poloměru při sběrné ploše solární energie 40 m².

Systém popsany v diplomové práci lze využít i jako ostrovní systém, a sice v kombinaci s parním strojem nebo s fotovoltaickými panely pro výrobu elektrické energie.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČEZ, a. s. Využití sluneční energie [online]. 2016 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/slunce/informace-o-slunecni-energetice.html>
- [2] Chroma Energy Pvt. Ltd. CPV Technology. [online]. 20016 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: http://www.chromaenergy.in/enr/index.php?option=com_content&view=article&id=80&Itemid=101
- [3] Solarflect Energy: What about future advances in solar technology?. [online]. 20015 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.solaflect.com/faq-what-about-future-advances-in-solar-technology/>
- [4] SARI, Ahmet a Ali KARAIPEKLI. Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material [online]. 2007 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1359431106004030>
- [5] ČSN EN ISO 8894-1. *Žárovzdorné materiály – stanovení tepelné vodivosti. Část 1: Metoda topného drátu (křížové uspořádání a uspořádání s odporovým teploměrem)*. Praha: ČNI, 2011.
- [6] Hashem, H.: Dish Stirling for Dubai? [online]. 2014 [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://analysis.newenergyupdate.com/csp-today/markets/dish-stirling-dubai>
- [7] SHARMA, Atul, V.V. TYAGI, C.R. CHEN a D. BUDDHI. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009, vol. 13, issue 2, s. 318-345. DOI: 10.1016/j.rser.2007.10.005. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032107001402>.
- [8] GIL, Antoni, Marc MEDRANO, Martorell INGRID, Lázaro ANA, Pablo DOLADO, Belén ZALBA a Luisa F. CABEZA. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization: An International Journal. *Renewable and Sustainable Energy*

Reviews: power for a sustainable future. Oxford University Press, 2010, vol. 14, issue 1, s. 31-55. DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.035. [online]. 2010 [cit. 2016-04-20]. DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.035. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032109001774>.

[9] The Engineering ToolBox. Energy stored as sensible heat in materials [online]. 2017 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: http://www.engineeringtoolbox.com/sensible-heat-storage-d_1217.html

[10] LADENER, H., SPÄTE, F. *Solární zařízení*. 1. vyd. Praha: Grada, 2003. Stavitel. ISBN 80-247-0362-9.

[11] SOLARENVI. *Solární kolektory pro ohřev užitkové vody* [online]. 2014 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://www.solarenavi.cz/a-16-solarni-kolektory-pro-ohrev-uzitkove-vody.html>

[12] CHLUBNÝ, J., J. LEDNICKÝ, R. SEDLAČÍK a L. SLEZÁČKOVÁ. *Obnovitelné zdroje energie* [online]. 2010 [cit. 2017-11-14]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/6540-Obnovitelne-zdroje-energie.html>

[13] Moje elektrárna. Energie ze Slunce [online]. 2013 [cit. 2017-11-14]. Dostupné z: <http://www.mojeelektrarna.cz/energie-ze-slunce.html>

[14] EHRLICH, P. a kolektiv. *Solární elektrárny* [online]. ©2013 [cit. 2017-11-14]. Dostupné z: http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=solarni_elektrarny&site=energie

[15] PERLIT. *Výroba a prodej expandovaného perlitu, omítkových a betonových směsí*. [online]. 2017 [cit. 2017-11-14]. Dostupné z: <http://www.perlit.cz/expandovany-perlit/>

[16] Promat. *PROMASIL®-1100 SUPER* [online]. 2014 [cit. 2017-11-14]. Dostupné z: <http://www.promat-hpi.com/cs-cz/produkty/kalciumsilik%C3%A1tov%C3%A9-produkty/promasil-1100-super-products>

[17] Promat. *PROMATECT-L500* [online]. 2017 [cit. 2017-11-14]. Dostupné z: <http://web.promatpraha.cz/pozarni-bezpcnost-staveb/prehled-materialu/promatect-l500>

- [18] PROMAT. *Vysokoteplotní konstrukční a izolační materiály* [online]. 2014 [cit. 2017-11-14]. Dostupné z: http://web.promatpraha.cz/download.php?file=6182.pdf&name=_HPI_Katalog_2014_komplet_low.pdf
- [19] PROMAT. *Mikroporézní produkty* [online]. 2014 [cit. 2017-11-14]. Dostupné z: <http://www.promat-hpi.com/cs-cz/produkty/mikropor%C3%A9zn%C3%AD>
- [20] PROMAT. *Používání izolace Microtherm®: nejjednodušší cesta k optimalizaci tepelné účinnosti* [online]. 2017 [cit. 2017-11-14]. Dostupné z: <http://www.promat-hpi.com/cs-cz/technologie/p%C5%99ehled/microporous>
- [21] PROMAT. *MIKROPORÉZNÍ TECHNOLOGIE* [online]. 2017 [cit. 2017-11-14]. Dostupné z: http://web.promatpraha.cz/admin/files_upl/6285.pdf
- [22] Czech nature energy. *Termické systémy pro ohřev vody a podporu vytápění*. [online]. 2016 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.cne.cz/solarni-ohrev-vody/uvod-do-termickych-systemu/>
- [23] Envic. *Trombeho stěna – vyhodnocení efektivity v diplomové práci*. [online]. 2009 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://old.envic-sdruzeni.cz/trombeho-stena-vyhodnoceni-efektivita-v-diplomove-praci.htm>
- [24] MATUŠKA, T. *Solární zařízení v příkladech*. 1. vyd. Praha: Grada, 2013. Stavitel. ISBN 978-80-247-3525-2.
- [25] OSTRÝ, M. *Akumulace tepla při změnách skupenství* [online]. 2012 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/akumulace-tepla-pri-zmenach-skupenstvi>
- [26] MOKRIŠ, L. *Akumulace tepla v solárních tepelných soustavách* [online]. 2011 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41947.
- [27] VETCHÝ, J. *Žárovbeton (beton odolný vysoké teplotě)* [online]. 2015 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.mct.cz/soubor/zarobeton/>
- [28] NEVŘIVOVÁ, L. *Speciální keramika*. Modul BJ14_M04 *Žárovzdorné materiály*. Učební texty VUT Brno 2006., s. 1-68.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Q	[J]	množství akumulovaného tepla
m	[kg]	hmotnost tepelně-akumulačního média
c_p	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita
T	[°C]	teplota
a_m	[-]	podíl tekuté fáze
Δh_m	[J.kg ⁻¹]	teplo tavení na jednotku hmotnosti
c_{sp}	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	tepelná kapacita
c_{lp}	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	tepelná kapacita
a_r	[-]	podíl reagujících látek
ΔH	[J.kg ⁻¹]	reakční teplo
α	[m ² .s ⁻²]	měrná teplotní vodivost
λ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	měrná tepelná vodivost
C	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	měrné teplo
ρ_b	[kg.m ⁻³]	objemová hmotnost
c_p	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	měrné teplo při konstantním tlaku
P	[W.m ⁻¹]	elektrický příkon
t_1, t_2	[s]	čas
$\Delta\theta_2, \Delta\theta_1$	[K.s ⁻¹]	nárůst teploty
V	[m ³]	objem látky